



O QUE É COSMOLOGIA?

A REVOLUÇÃO DO PENSAMENTO COSMOLÓGICO

MÁRIO NOVELLO

J O R G E Z A H A R E D I T O R



MÁRIO NOVELLO

O QUE É COSMOLOGIA?

A REVOLUÇÃO DO PENSAMENTO COSMOLÓGICO



ZAHAR
Rio de Janeiro

Advertência

Durante o segundo semestre de 2003, meu curso sobre questões cosmológicas, no Instituto de Cosmologia, Relatividade e Astrofísica (ICRA), no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), rua Doutor Xavier Sigaud, nº 150, constituiu-se de 36 horas de aulas. Na verdade, eu deveria dizer que esse número de horas representa somente a metade das aulas que dei naquele período. Explico por quê: às segundas e quintas, das 14 às 16 horas, eu apresentava um curso regular, técnico, sobre cosmologia relativista para estudantes de mestrado e doutorado que se dedicavam a seguir estudos avançados nessa área. Às terças e quintas, das 18 às 20 horas, repetia a mesma sequência do curso para estudantes de psicologia e filosofia, abstando-me de entrar nos detalhes técnicos apresentados no curso do CBPF. Este livro é um resumo das aulas para não especialistas. Quanto às outras, a versão técnica, boa parte delas está disponível no site do CBPF — www.cbpf.br —, em Escolas Brasileiras de Cosmologia e Gravitação.

Agradecimentos

A Cristina Zahar, que pacientemente me provocou durante o último ano para que este livro viesse à tona; a meus alunos e colaboradores, com quem tenho dialogado de modo cotidiano, sobretudo quanto às questões técnicas; a meus amigos e colaboradores José Martins Salim e Luis Alberto de Oliveira, pelas conversas e discussões ao longo dos anos; ao professor Amaral Vieira, que me tem feito inúmeras indagações sobre o Universo; ao professor Edgar Elbaz, pelos diálogos infindáveis que tivemos nos últimos anos, em sua casa de campo, nos arredores de Lyon. Remo Ruffini me convidou a passar um mês de 2005 — e usar toda a sua infraestrutura — no Internacional Center for Relativistic Astrophysics, sede da ICRANet, em Pescara, dando-me condições para que eu tivesse liberdade e tempo para terminar os comentários finais deste livro. Foi precisamente o que fiz, tendo a beleza do mar Adriático bem à minha frente.

Sumário

Prólogo

Prefácio

Introdução

1. Cosmologia segundo Einstein

As diferentes forças do mundo

O objeto da cosmologia

O Programa Cosmológico de Einstein

Gravitação: geometria ou campo?

2. O modelo cosmológico de Einstein

Deixando as estruturas absolutas para trás?

Propriedades básicas do Universo de Einstein

O mundo é fechado?

3. Algumas definições

Cosmologia física

4. A fundação da física

Fundação regional

Refundação global

Três períodos da cosmologia moderna

Unificação, conteúdo e forma: refundação regional

Por que a cosmologia é a refundação da física?

5. O estado fundamental

As diferentes formas de matéria e a simetria fundamental do espaço-tempo

Hádrons e léptons, mésons, fótons e grávitons
Observadores inerciais e o grupo de Poincaré
As origens geométricas das simetrias
Observadores acelerados
O grupo de simetrias do espaço-tempo de deSitter
Estado fundamental
Minkowski ou deSitter?

6. O Grande Lambda

Grande Lambda como um fluido perfeito?
Grande Lambda como energia do vácuo dos campos da física?
Grande Lambda e o vácuo dos campos físicos
Grande Lambda e a massa do gráviton
Teoria do alcance de Yukawa

7. Cosmologias

Cosmologia segundo deSitter
Cosmologia segundo Friedmann
Três momentos da cosmologia
Cosmologia segundo Dirac

8. Mitos cosmogônicos

Mito científico de criação
Hipótese do big-bang como começo do mundo
Pequeno histórico
Os teoremas da singularidade
Da aceleração do Universo à singularidade

9. Cosmologia segundo Gödel

Tempo no Universo de Gödel
Revolução dentro da revolução

Pequena descrição do Universo de Gödel

Uma breve comparação dos modelos de Universo de Einstein e Gödel

10. Do vazio com Lambda ao vazio sem Lambda

O vazio

Cosmologia segundo Kasner

Belinsky, Khalatnikov e Lifshitz

11. Modos de criação do Universo

Modos de criação

Universo eterno ou big-bang?

Criação espontânea: Universo quântico

Cenários de Universo eterno

A eternidade é instável?

12. A irresistível atração para existir

O mundo linear e não linear

Pequeno *intermezzo* matemático

Conclusão

Reflexão final

Bibliografia

Prólogo

Ao empreender o exame de qualquer fenômeno, a física newtoniana pressupunha a existência de uma estrutura *a priori* sobre o mundo: o cenário ou pano de fundo que constitui a referência de todos os eventos. Até o aparecimento da teoria da relatividade, no início do século XX, esse cenário aparecia sob a forma de um substrato eterno, estático, imutável, sem a possibilidade de qualquer investigação ulterior, constituindo uma estrutura imaterial, a envolver diafanamente todos os corpos materiais, e sendo identificado ao "espaço" e ao "tempo" absolutos.

Que a ciência tenha lançado mão aprioristicamente de tal estrutura, a tenha gerenciado em seu interior, para finalmente projetá-la em um território idealizado, ao qual ela não tinha acesso — poderia ser hoje motivo de espanto. Entretanto, a situação é facilmente compreendida. Essa estrutura, como ensinou Heidegger,¹ em uma releitura de Kant, desempenha o papel necessário à fundação da nova ciência, na gestação preliminar de suas bases. Ela constitui uma formalização ingênua de seus fundamentos, com a função de permitir, em seus primórdios, a sustentação necessária, embora provisória, da ciência nascente.

No Universo newtoniano, a totalidade imaterial do mundo se identificava com o espaço e o tempo absolutos, que constituíam a arena onde a física deveria construir suas experiências e elaborar suas leis. A descrição dessa arena não fazia parte do projeto científico, mas se encontrava fixada no território longínquo e até certo ponto desprezado da metafísica — que se erguera, ao longo dos séculos, como o perigoso competidor a ser vencido. Isso significava, na prática, a subordinação dos fundamentos da descrição racional do mundo a uma visão apriorística, limitando desse modo sua ação.

Para levar adiante esse programa, iniciado no século XVI por vários cientistas — entre os quais, simbolicamente, podemos citar Galileu —,

Newton e seus aliados precisaram apresentar-se como instrumentos de uma luta vitoriosa contra séculos de obcecante dominação da interpretação aristotélica dos fatos. Não somente como inovadores, produtores de uma leitura e uma nova interpretação objetiva da totalidade dos fenômenos da natureza, mas também como articuladores de um pensamento emergente, capaz de transbordar para outras áreas além da ciência física, de produzir uma compreensão racional dos processos físicos de caráter tão geral, tão universal, que poderiam ser aplicados às ciências humanas e até mesmo gerar uma nova leitura dos mecanismos de funcionamento da sociedade. Com efeito, as dramáticas mudanças sociais e econômicas que ocorriam na Europa começavam a exhibir as dificuldades de permanência da visão aristotélica, posto que esta já não conseguia mais descrever as conturbações de um mundo politicamente em conflito. E, no entanto, a aparência arrogante da nova ciência, seu notável sucesso e reconhecimento universal escondiam a dificuldade dessa física newtoniana em conseguir tratar, em seu interior, de questões envolvendo a totalidade maior, identificada com tudo-que-existe.

Tal comportamento adotado pela comunidade científica da época é compreensível. Afinal, havia uma batalha enorme a ser travada contra os arcaicos modos de pensar o mundo que a ciência então nascente pretendia substituir. Tratava-se, então, de uma luta pelo poder de representar o mundo, com todas as consequências que tal embate provoca. O núcleo central do projeto científico emergente — que incluía como seu principal ponto de apoio a reformulação completa do universo aristotélico e que, portanto, precisava exhibir as origens de sua fundação — entendia postergar essa questão maior para um tempo futuro, que chegaria tão logo sua superioridade sobre o antigo modo idealista de tratar os fenômenos fosse ostensivamente proclamada.

Infelizmente, a história das ideias nos ensina que a fundação de qualquer ciência não se pretende nunca provisória, e sua substituição não se faz sem uma desesperada batalha. Com efeito, ao longo dos séculos seguintes, em pleno domínio da visão newtoniana do mundo, aquelas primeiras ideias provisórias que lhe haviam dado origem lentamente sedimentaram-se, gerando um sistema reacionário de pensar a totalidade terminando por negar qualquer acesso do já então dominante pensamento científico às

questões de seus fundamentos. Ao negar sua condição provisória, a estruturação do universo newtoniano, montada em bases apriorísticas, passou a negar qualquer tentativa de renovação de suas bases. Terminada sua função inicial de crítica ao programa aristotélico, e alçado como substituto daquele, o modo newtoniano de representar o mundo tornou-se pouco a pouco um pensamento reacionário, passando, então, à condição de verdadeiro inimigo a ser combatido por aqueles que não aceitam forma alguma de dogmatismo e procuram a mudança incessante e contínua dos paradigmas de descrição do Universo.

Trezentos anos depois, no início do século XX, a revolução produzida por Poincaré, Lorentz, Einstein e outros cientistas fez-se sentir de modo profundo quando conseguiu explicitar a fantástica mudança que trazia em seu interior, e que poderíamos caracterizar como uma verdadeira crítica da razão cósmica. A nova teoria da relatividade, radical, pretendia mover uma batalha contra os apriorismos do substrato cósmico newtoniano, retomando para a física a tarefa de lidar com a grande totalidade ou, como passamos desde então a denominá-la, Universo, e provocando no seio dessa ciência a necessidade de gerar modelos cosmológicos.

Com efeito, a mudança proposta por esses cientistas, sintetizada no pensamento de Einstein e elaborada em sua teoria da relatividade, tinha um alvo, um inimigo certo: era Kant o visado. Em primeiro lugar, era preciso liquidar sua ideia apriorística de espaço e de tempo que sustentava a transposição destes para o cenário absolutista que Newton tão bem empregara, permitindo a formalização da cosmologia newtoniana. Em seu livro *O significado da relatividade*, Einstein explicita esse ataque quando afirma: "Estou convencido de que foi extremamente prejudicial para o progresso do pensamento científico o empenho dos filósofos em tirar do domínio do empirismo certos conceitos fundamentais, trasladando-os desse domínio, que está sob nosso controle, para as alturas intangíveis do apriorismo." Ele se refere precisamente ao apriorismo kantiano, que levava à elaboração das estruturas espaço absoluto e tempo absoluto na física clássica.

Entre as diferentes características que definem a natureza do espaço e do tempo, reconhecemos a topologia e a geometria como fundamentais. Como não existe teoria formal capaz de associar a topologia do Universo a

propriedades da matéria, irei me ater, ao longo deste livro, a examinar somente sua geometria. Réguas e relógios são os instrumentos que devemos usar para obter essa informação. Deveríamos deixar de lado, argumenta Einstein, as ideias apriorísticas com as quais, ao longo de séculos, apreendemos a geometria do mundo a partir de uma experiência local específica e limitada. Devemos partir do reconhecimento de que a base de toda a geometria são os instrumentos de medida com os quais determinamos suas propriedades. Isso significa colocar a física à frente da geometria, abandonando definitivamente o apriorismo kantiano.

Em um primeiro momento, isso se fez olhando-se somente a cinemática do mundo: o movimento dos corpos materiais e sua relação com observadores e o estado do movimento desses observadores. Essa fase — função típica da teoria da relatividade especial — gerou a estrutura mental unificada que chamamos de espaço-tempo. Sua maior simplificação consistia em aceitar a condição absoluta da existência de uma geometria única, global, sem estrutura, sem dinâmica.

Em um momento posterior, o grande passo dado — a construção da relatividade geral — retirou do Olimpo a geometria do mundo, permitindo que ela dependesse de seu conteúdo, da distribuição de matéria e energia existentes. No sentido heideggeriano, Einstein permitiu, com seu audacioso programa, o início da fase de formulação crítica da ciência, encaminhando sua investigação através do nascimento da cosmologia moderna, no rumo da refundação da física. O projeto maior da física entrou, assim, no período de crítica de seus fundamentos graças à atitude einsteiniana de empreender o reexame das estruturas que constituem as bases da descrição racional do Universo.

Neste ensaio, não me dedicarei a descrever com detalhes esse trabalho de crítica, mas procurarei mostrar algumas de suas consequências que alteraram decisivamente o modo moderno de representar o universo da ciência no século XX. Também iremos conhecer os primeiros passos que, ao final daquele século, foram dados no início da crítica dos fundamentos da própria cosmologia.

Para entender o que é isso que chamamos de cosmologia, é preciso voltar a pensar o modo pelo qual ela teve início no século XX, pensar a questão cosmológica como Einstein a formulou e examinar se ela ainda faz sentido

hoje, ou se devemos modificá-la e em que direção. Veremos que a questão colocada por Einstein ainda faz sentido e, mais ainda, que ela possui uma riqueza conceitual que dá à cosmologia a possibilidade de um *aggiornamento* que poderíamos comodamente aceitar como permanente, sem que isso exija o afastamento de sua formulação primeira. Desse modo, retomando essa caminhada, veremos que a cosmologia, continuamente atualizada, nada mais é que um modo crítico de pensar a totalidade do Universo, permitindo assim elaborar a refundação da física. Como devemos entender essa ação?

¹ Martin Heidegger, *Interpretation phénoménologique de la Critique de la raison pure de Kant*.

Para evitar que as pessoas, seguindo em procissão, ao longo das regiões montanhosas da Grécia pré-socrática, se perdessem pelos desvios e tortuosidade dos caminhos, escolhia-se um sacerdote para que de tempos em tempos, subindo à montanha mais alta, fizesse sinais aos que se desgarravam. Esses personagens que indicavam o caminho a seguir eram chamados *theoros*.*

* Werner Jaeger, *Paídeia: a formação do homem grego*

Prefácio

Nos últimos anos a cosmologia adquiriu enorme popularidade. Várias obras de divulgação têm aparecido, quase todas apresentando os avanços dessa ciência pelo exame de suas conquistas nas últimas décadas. Este livro não seguirá tal caminho, embora também seja obrigado a examinar esses avanços. Mas me limitarei a comentá-los somente na medida em que tornem mais transparente minha exposição. Portanto, este não é um livro de história da cosmologia no século XX, apesar de a ideia de algum dia retomar essa história do ponto em que Jacques Merleau-Ponty a deixou, em 1950, seja com certeza atraente. Mas não é esse meu projeto aqui. Estarei neste livro empreendendo uma tarefa distinta. Levarei o leitor por um caminho especial, cuidadoso e cheio de encantamento, para construir uma resposta à questão principal: o que é cosmologia?

Gostaria de alertar o leitor, contudo, para o fato de que não estou interessado em uma definição formal da cosmologia, aquela que em geral figura nos dicionários. Quero expor uma certa tensão entre diferentes pontos de vista que os cosmólogos apresentam na caracterização de sua ciência e — ao deixar clara a origem do conflito que daí decorre — exhibir, a partir desse território, a função da cosmologia.

Todo discurso, científico ou não, que se envolva com questões relacionadas a totalidades — qualquer que ela seja — penetra um lugar comum, uma terra de ninguém, onde diferentes saberes se encontram e disputam a supremacia e a posse do território, como a lógica, a metafísica e a mitologia. Essa batalha não é travada diretamente, pois a opção por um dado saber representa uma escolha individual que se é obrigado a fazer em um dado momento. Tomada a decisão, escolhido o modo pelo qual se vai à luta, trata-se então de desqualificar todas as outras opções.

Enquanto em toda disputa entre saberes conflitantes a batalha só é interrompida quando um deles é declarado vencedor, no caso em questão, outro desfecho parece ser possível. A cosmologia, do modo como a entendo e irei descrevê-la, permite inaugurar uma atitude nova quando sugerirmos o abandono da arrogância que todo saber eficiente comporta.

Para explicitar essa atitude, é preciso examinar a prática daquele que chamarei de cosmólogo¹ e sua atitude em face da comparação dos cenários alternativos do Universo criados pelos diferentes saberes — quer no interior da cosmologia, quer através das várias cosmogonias que, ao longo da história, as diferentes civilizações elaboraram, produzindo e exibindo seus correspondentes modos de criação de tudo-que-existe —, reconhecer esses saberes como legítimos e relativizá-los. Enfim, entender a função dos mitos cosmogônicos de criação. Desse modo, o cosmólogo, ao empreender um mergulho profundo em sua prática, estaria produzindo um compromisso entre diferentes saberes tradicionais e poderia ser levado a declarar que sua função atual não tem mais por objetivo a destruição do saber-do-outro, mas produzir a desqualificação do saber-poder. Tal afirmação exigiria comentário mais extenso, que deixarei para outra oportunidade. Meu propósito ao ousar antecipar aqui esse aspecto deve ser compreendido como uma declaração de princípio cuja base de sustentação não devemos procurar na lógica, mas sim no embate cotidiano entre os cientistas, isto é, de natureza política.

Para entender o que é cosmologia, devemos observar que um detalhe importante mas essencial para sua compreensão consiste em reconhecer que a união de toda a física, isto é, as diferentes partes da física somadas, não permite entender o Universo, não produz uma unidade do mundo. Falta-lhe alguma coisa. O que é isso que está faltando? Que coisa é esta que falta ao considerarmos a classe completa dos conhecimentos da física? Porque, ao aplicarmos a física a cada uma de suas partes — desde os átomos até as galáxias, e mesmo além, no interior das partículas elementares, bem como nos aglomerados de galáxias —, fica faltando algo. O que é isso que falta? Por que podemos dizer que, ao considerar todas as suas estruturas, ao aplicar cada parte da física, de modo coerente e solidário, à imensidão do Universo, não conseguimos descrever essa unidade? Onde está aquilo que não podemos compreender com a física? Que pedaço, que parte do

Universo não admite compreensão? Onde localizar, no conjunto de ideias e conceitos bem definidos e bem testados que essa ciência oferece, aquilo que está faltando?

Em verdade a resposta a essa questão não se encontra em lugar algum da física. Ela está além. Aí não podemos sequer reconhecer sua ausência, pois ela é precisamente aquilo que permite separar esta ciência, a física, da cosmologia e depende, de modo indissolúvel, dessa totalidade que chamamos de Universo. É isso que iremos examinar nas páginas que se seguem.

¹ Talvez fosse conveniente alertar o leitor para o fato de que irei comentar aspectos presentes no físico e no cosmólogo. O que importa nessa distinção é mais a atitude, um certo modo de olhar o mundo. Assim, chamo de cosmólogo aquele que prioriza a totalidade. Poderia chamá-lo também de físico *global*, mas, por simples escolha pessoal, prefiro designá-lo como cosmólogo.

Introdução

Em fevereiro de 1917, Albert Einstein fez a primeira tentativa de aplicar sua então recente teoria da relatividade geral — na verdade nada mais que uma nova teoria da gravitação — ao Universo. Ao fazê-lo, promoveu uma profunda transformação em uma ciência que durante toda a primeira metade do século XX parecia destinada a nunca ser creditada como tal: a cosmologia.

Ao mesmo tempo que estabelece em termos precisos, e dentro dos parâmetros convencionais da ciência da época, como deve ser colocada a *questão cosmológica* e sobre que bases a resposta deveria ser encontrada, Einstein produz um Programa Cosmológico que iria nortear a evolução dessa ciência ao longo de todo o século XX. Para mostrar a um só tempo a coerência de sua formulação e as consequências que ela poderia induzir, ele conclui sua introdução a esse programa apresentando um exemplo completo de sua realização, a que chamou de *modelo cosmológico* — isto é, a descrição conjunta da geometria e do conteúdo material existente no Universo. Estas duas entidades — geometria e matéria — não são independentes, mas estão articuladas pelo vínculo existente na equação que determina a evolução dos processos gravitacionais na nova teoria.

O modelo cosmológico que Einstein nos oferece é simples, demais até, e é incapaz de produzir alguma previsão digna de nota. Pouco tempo depois, quase em seguida, surgiram, com mais sucesso, outras descrições do Universo, que relegaram a um papel secundário, sem maior importância, aquele primeiro modelo. Isso a tal ponto que hoje a comunidade científica o considera como se não representasse nada mais que uma parte ultrapassada da história da cosmologia. Em seu estudo epistemológico e histórico das teorias da cosmologia da primeira metade do século XX, Merleau-Ponty chegou mesmo a argumentar que esse começo, essa primeira tentativa de

instituir uma cosmologia, terminara em um fracasso. Não somente pelas dificuldades formais iniciais desse modelo como por sua incapacidade ulterior de explicar os fatos observados — entre os quais aquele mais importante, que consiste na evolução do Universo, sua dinâmica, a dependência temporal da geometria e da matéria existente.

E, no entanto, é preciso separar claramente o *Programa Cosmológico* de Einstein de seu *modelo cosmológico*, posto que, mesmo com o pesado ônus da incapacidade explicativa, mesmo exibindo claramente as dificuldades formais desse modelo, somos levados a afirmar a atualidade do arcabouço no qual esse modelo foi criado. Ainda hoje, toda a cosmologia repousa sobre essa formulação original na qual se estruturou o Programa Cosmológico introduzido por Einstein.

Mas como é isso possível? Por que razões uma ultrapassada descrição do mundo pode ainda ser considerada viva, importante, digna de ser examinada, de permanecer até mesmo fundamental? Quais argumentos devem ser invocados, sobre que propriedades ou interpretação estamos baseados para dar sentido a essa afirmação?

A cosmologia moderna experimentou um sucesso notável nas últimas décadas e dá sensíveis mostras de que ultrapassou as dificuldades associadas à sua formação original, afastando-se cada vez mais de seu começo especulativo para se afirmar como exemplo de ciência convencional, articulando teoria e observação. Como então é possível afirmar que, embora tenha tido esse enorme progresso, ela não superou o quadro formal estabelecido por Einstein, em uma época em que ela exibia sem subterfúgios essas dificuldades e caracterizava-se então como puramente especulativa? De onde podemos extrair argumentos que deem significado e, mais importante ainda, que sustentem essa afirmação?

Para entender essas questões devemos percorrer um caminho que nos levará a examinar, mesmo que brevemente, alguns importantes momentos da história da cosmologia no século XX. Entretanto, antes de entrarmos nesse caminho e de mergulharmos nos detalhes técnicos que os cosmólogos têm desenvolvido, façamos uma primeira síntese do que encontraremos nessa análise. Não irei neste momento expor as razões que levam às conclusões a que chegaremos, mas me limitarei a apresentá-las, para que o leitor tenha uma primeira visão unificada da questão.

Todos os modelos que sucederam o primeiro modelo cosmológico, com apenas uma exceção (ver *Comentário 1*, ao final deste capítulo), usaram as premissas sobre as quais Einstein conseguiu estabelecer uma geometria global. Alguns aceitando, outros confrontando essas premissas entre si e com outras, negando algumas ou se opondo a elas, todos se estruturaram em referência ao que Einstein elaborou ao fundar a cosmologia moderna com o programa que, de modo simbólico, denominou *a questão cosmológica*.

Ao caracterizar o que seria, para ele, a função dessa ciência, Einstein estabeleceu com rigor e precisão o que deveria ser pensado como cosmológico. Assim fazendo, e mesmo sem querer, colocou um problema que tomaremos como fundamental: saber se essa cosmologia, ou qualquer cosmologia futura, deveria identificar-se com a física ou ser tratada como uma atividade nova. Estaríamos sendo imprudentes ao aplicar, para produzir uma descrição do Universo, a física convencional, local, estabelecida para o que está em nossa vizinhança, extrapolando o território de sua validade para além do que a observação garante? Com certeza nos situamos dentro da tradição científica, praticando aquilo que convencionalmente tem sido feito pelos cientistas, isto é, extrapolar resultados para além do limite seguro de sua comprovação experimental até o momento em que deparamos com alguma contradição ou resultado novo que exija uma mudança formal naquela descrição. Podemos proceder do mesmo modo ao tratar do Universo?

A resposta a essa questão constitui o centro de toda análise crítica da cosmologia. Dito de outro modo, para construirmos uma descrição do Universo, é preciso introduzir algum outro elemento? Precisamos de alguma hipótese adicional que não esteja contida na física? De uma hipótese que não pode ser elaborada no interior da física, pois que aí ela sequer faria sentido? Devemos introduzir alguma propriedade que só tenha significado global, isto é, quando aplicada ao Universo como um todo, e que não induza a nenhum fenômeno observável, nenhuma alteração sensível localmente? Iremos ver que Einstein produziu uma segunda teoria da gravitação quando deu início à reformulação da cosmologia, provocando nela uma reviravolta — ao responder "sim" a todas essas perguntas.

É por isso que, embora o modelo de Einstein não represente a versão atual da cosmologia, qualquer tentativa de superação de seu programa — a

partir do qual uma nova versão seja elaborada — deveria inevitavelmente passar pela desqualificação de alguma de suas hipóteses — das quais a mais fundamental é precisamente aquela que constitui o divisor de águas entre o programa original de Einstein da cosmologia e a ciência tradicional. A base daquele programa organizou-se segundo a crença de que a cosmologia não se esgota na física. Essa atitude não era original na ciência. A lógica, por exemplo, se organiza distinguindo com clareza certa categoria de objetos formais que possuem a característica de "totalidade", e, a partir deles, todos os demais elementos são estruturados e ganham significado.

Para entender como a cosmologia pôde se organizar, devemos começar pela caracterização empreendida para singularizar e compreender o objeto dessa ciência, isto é, do que trata realmente a cosmologia? A primeira resposta que nos é dada parece segura, mas não revela muita coisa e certamente não nos satisfaz. Não devemos nos contentar com ela. Ela nos diz, provisoriamente, que a cosmologia trata do Universo, ou seja, a cosmologia é "a ciência cujo objetivo é descrever e tornar compreensível, de acordo com as leis da física, as propriedades típicas do Universo, considerado como um todo".¹ Mas o que é isto que chamamos de Universo? Poderíamos ser tentados a aceitar a definição simplista de que *o Universo deve se identificar com a totalidade do espaço, do tempo, da matéria e da energia*.

De imediato, essa caracterização coloca a cosmologia como a ciência mais fundamental e ao mesmo tempo projeta-a em um território nebuloso que poderia ser identificado como não constituindo parte da ciência. Foi precisamente a aceitação simplista dessa definição que produziu, ao longo da primeira metade do século XX, as dificuldades formais que impossibilitavam à cosmologia, durante muito tempo, ser aceita como ciência. A razão disso, como deriva da definição, estaria ligada à aparente impossibilidade de observarmos seu objeto de estudo, a *totalidade*. Com efeito, toda observação na física, como em qualquer ciência, é limitada no espaço e no tempo. Toda observação, toda medida, deveria se subordinar a essa limitação que nada mais é que a condição restrita daquele que observa, do cientista, ao realizar seus experimentos. Disso resulta que as questões envolvendo um conceito assim vagamente caracterizado — *a totalidade do que existe* — não deveriam constituir objeto de ciência alguma (ver

Comentário 2 ao final do capítulo). Como não se poderia observar o Universo enquanto tal, isto é, em sua totalidade, não poderíamos produzir uma ciência a partir desse objeto vago e inobservável.

Ao caracterizar a cosmologia como a ciência da totalidade, que trata de tudo-que-existe, estaríamos *ipso facto* gerando essa dificuldade? O conceito de totalidade parece ser impreciso, tem uma conotação vaga que impediria sua aceitação como "objeto de análise". Mais grave ainda: ele favorece uma perigosa e certamente indesejável aproximação — mesmo que somente de tema de trabalho — com outros saberes e não saberes, aproximação que os físicos não gostariam de ter. Só para citar um exemplo escandaloso: esse conceito permitiria a formulação de questões, no interior da cosmologia, do lado de dentro da ciência, envolvendo a criação do mundo — tarefa que a ciência moderna sempre considerou inferior, de conteúdo irracional e que estaria, no imaginário do cientista, associada a antigos mitos cosmogônicos que, por sua natureza, sempre foram considerados impossíveis de se associar a uma prática científica.

Essa era a situação nas primeiras décadas do século XX. Entretanto, por volta de 1930 e, mais tarde, em 1964, duas experiências cruciais mudaram radicalmente o ponto de vista da comunidade científica a respeito da questão. Com efeito, no final da década de 1920, o astrônomo norte-americano Hubble realizou observações que permitiram interpretar certas alterações no comportamento da luz proveniente de fontes de fora de nossa galáxia como a demonstração de que o Universo como um todo experimentava um processo de expansão. O volume total do espaço tridimensional estaria variando com o tempo cósmico. Em 1964, os astrofísicos Arno Penzias e Robert Wilson exibiram provas observacionais concludentes de que o Universo estava banhado em um gás de fótons em equilíbrio térmico, fato que poderia ser interpretado como associado a um corpo negro à temperatura de 2,7 graus Kelvin. Como consequência dessa interpretação, o Universo teria sido menor e mais quente no passado.

O que há de comum nessas observações é que não se referem a propriedades locais, não falam desta ou daquela galáxia, não tratam de processos localizados compactamente no espaço e no tempo, mas, ao contrário, pretendem se articular para produzir este objeto formal, o Universo. Assim, elas devem ser entendidas como garantia de que a

totalidade do que existe pode ser observável enquanto tal, isto é, como totalidade. A primeira grande consequência dessas observações deveria ser a aceitação, por parte da comunidade científica, de que caberia considerar a cosmologia como ciência, posto que dotada de método, objeto de trabalho e teoria. Enfim, poderia constituir um quadro teórico-observacional coerente e compatível com as características da física.

Surge então uma situação paradoxal. As observações de Hubble, Penzias e Wilson pareciam tornar a totalidade Universo um objeto aceitável na constituição da cosmologia. Curiosamente, entretanto, logo ficou claro que essa ciência nascente que pretendia produzir um discurso científico sobre o Universo, para conseguir ser tratada de fato como ciência, deveria abdicar de suas pretensões primeiras, incluídas no Programa Cosmológico de Einstein. Ela deveria deixar de lado seu objetivo maior — visto por muitos cientistas como metafísico — de produzir um cenário completo do Universo como um todo. Tal amplidão era considerada inaceitável por físicos e astrônomos.

Depois que as observações cósmicas abriram para os cientistas as propriedades escondidas do Universo profundo, apareceu uma reação irresistível no interior da física. Esse movimento, que de súbito tomou conta da maioria da comunidade científica, consistia em restringir a atuação da cosmologia. Esta poderia ser aceita como ciência, mas deveria abdicar da totalidade para se referir a questões convencionais da ciência. Sua especificidade não estaria relacionada a um discurso totalmente novo e sem igual no mundo da ciência — cabia, por exemplo, resistir à tentação de usar conceitos historicamente associados por outros saberes à totalidade —, e deveria se limitar a tratar de quantidades convencionais, usando as ferramentas técnicas convencionais, tal como é feito pela física.² Enquanto esta última se ocuparia de processos, fenômenos, objetos astronômicos que ocorrem na Terra ou em nossa vizinhança, podendo mesmo se estender aos diferentes astros até os confins da Via Láctea, à cosmologia estaria reservada a tarefa de alargar esses domínios e constituir-se em uma física de grandes dimensões no espaço e no tempo, uma física das galáxias. Isso deveria ser entendido, no dialeto dos especialistas, como astrofísica extragaláctica, nada mais que isso. Essa foi a fórmula encontrada para fazer da cosmologia uma ciência: limitar o alcance de sua área de atuação,

retirando-lhe qualquer possibilidade de penetrar regiões tradicionalmente consideradas como pertencentes a outros saberes, outras práticas humanas, tal como, por exemplo, o exame da questão da criação do Universo, que deveria pertencer à metafísica racional ou à teologia racional.

A aceitação, pela maior parte da comunidade científica, de que a cosmologia deveria se subordinar à física, sem introduzir nenhum conceito novo, nenhuma propriedade que já não estivesse contida nesta ciência, fez com que, ao final da segunda metade do século XX, ela ganhasse um qualificativo e passasse a ser chamada de *cosmologia física*. Abandonava-se a ideia de Einstein de que, para entender o objeto da cosmologia, seriam necessários novos conceitos, novas propriedades. O Universo seria, nessa visão, um sistema físico convencional como qualquer outro sistema com os quais os cientistas lidam em seu cotidiano. Não haveria nenhuma propriedade extraordinária a exigir uma mudança profunda na física, a não ser — como acontece em qualquer novo território de qualquer ciência — aquelas que poderiam estar associadas a um específico *sistema físico*.

Para esses cientistas, o Programa Cosmológico de Einstein não introduzia nenhuma novidade além daquelas que a física estava acostumada a encontrar ao tratar de um novo processo, uma nova configuração, por mais complexa que fosse. Segundo essa interpretação, o modelo cosmológico de Einstein seria idêntico ao seu programa, se identificaria com ele. Como tal, Merleau-Ponty teria razão ao afirmar que Einstein fracassara em sua empreitada. Para esses cientistas, nada haveria de especial no programa einsteiniano, a não ser a propriedade desqualificadora de que seu modelo cosmológico não se adequava às observações (ver *Comentário 3* no final do capítulo).

E, no entanto, pretendo argumentar em direção oposta: a cosmologia deve ser pensada como algo mais que sua caracterização como uma física de grandes dimensões para poder ser tratada como a ciência da totalidade, recuperando, dessa maneira, sua formulação original. A cosmologia certamente é também isso, essa física extragalática, mas não se esgota nela. Suas consequências são mais amplas e profundas, destacam-se da física, para além da superfície em que esta situa sua argumentação, e tocam as raízes do próprio discurso racional sobre o mundo, penetrando aí um território comum disputado por diversos saberes.

Para compreender essa função adicional e grandiosa, bem como apresentar as razões que sustentam essa tese, seguiremos um método de análise direto. Iremos percorrer o caminho utilizado no estabelecimento da cosmologia no século XX. Teremos a oportunidade de seguir os passos iniciais de Einstein, que deram início à versão moderna da cosmologia, seu modo de conceber o que se convencionou chamar posteriormente de modelo cosmológico. Procuraremos fazer uma releitura de seu trabalho e dos que se seguiram. Veremos assim como a cosmologia possui uma função, no interior da ciência, semelhante à crítica kantiana com relação à metafísica. Essa proximidade estrutural entre dois saberes parece-me uma consequência inevitável da função que devemos atribuir à cosmologia.

Embora em todos os livros de cosmologia posteriores à obra de Einstein se argumente, corretamente, que há dificuldades e incompatibilidades em conciliar seu modelo com as observações, veremos que ele foi o único a entrever e preparar uma saída — ainda que provisória e insuficiente — para a crise da razão na ciência que todos os modelos cosmológicos desde então produziram. Mas, por enquanto, voltemos a considerar a definição preliminar com que, em seus primórdios, a cosmologia foi criada, isto é, como ciência que trata do Universo, sendo este definido, de um modo bastante vago, como tudo-que-existe. Ao aceitar essa caracterização, deveríamos começar a definir a função do cosmólogo pela especificação do que existe e jogar todo o peso da compreensão e elaboração formal dessa ciência sobre o significado que devemos atribuir à palavra *existir*. Em outro livro tratei dessa questão,³ reconhecendo que ela leva a uma tarefa que é exatamente aquela pela qual deveríamos terminar: a caracterização do que significa existir. Pois seria hora de voltar a repensá-la, criticá-la uma vez mais, para poder ultrapassá-la.

Começaremos nosso exame pela análise de algumas definições que recolhemos ao acaso em alguns livros que tratam do tema. Antes disso, cabe esclarecer o que a cosmologia *não* é, para liberá-la de vínculos conceituais utilizados de forma inadequada. Entre todos os problemas novos que a cosmologia pode produzir e que não possuem significado na física, um se destaca em particular, porque na física nem ao menos pode ser formulado: qual a origem do Universo? Desse modo, a cosmologia não se restringe a ser "uma ciência que trata de uma grande porção de espaço e de

tempo, contendo uma imensa quantidade de matéria e energia". Se assim fosse, ela não passaria da aplicação da física a uma grande porção de matéria. Os métodos de sua análise, aquilo que constitui sua prática, consistiriam somente nos métodos utilizados por essa ciência. Não seriam outros, não caberiam novos postulados de acesso. Ou, para permanecer em exemplos no interior da física, é como se procurássemos descrever as propriedades individuais de um corpo singular, de um átomo, tentando atribuir-lhe uma "temperatura individual", como se o próprio conceito de temperatura pudesse prescindir de uma coletividade maior que lhe dá sustentação e significância, sua contextualização. É essa contextualização que parece ser o estofa principal da cosmologia.

E por que precisaríamos de novos métodos e novos postulados nessa ciência? Em que lugar, em que característica, qual particular momento ou estágio de sua atuação nos impediria de continuar tratando-a convencionalmente como uma parte da física, sem que fosse preciso criar uma nova ciência? É isso que iremos examinar nestas reflexões.

Comentários

1. A exceção a que me refiro consiste na proposta de aplicar ideias da teoria quântica ao Universo. Isso envolveria, preliminarmente, realizar a tarefa de quantização do campo gravitacional. Embora várias propostas tenham sido examinadas, a quantização continua incompleta. Mesmo assim, empreendeu-se uma tentativa, ainda que limitada, de descrever algumas propriedades do Universo como estrutura quântica, resultando em novas questões que estão longe de ser completamente entendidas. Só para citar um exemplo, propostas foram feitas para atribuir uma certa função de onda quântica ao Universo a partir de analogias formais com o processo convencional utilizado por Erwin Schrödinger em sua descrição do mundo quântico. A interpretação dessa função não poderia ser a convencional, probabilística, atribuída a processos quânticos usuais, como aqueles que envolvem aspectos atômicos da matéria a partir dos quais a interpretação foi estabelecida. A razão é simples: não existe a possibilidade de tratarmos um observador externo ao Universo a partir do qual a noção de probabilidade pudesse ser associada à classe de suas observações.

2. Heidegger sustentou uma posição oposta à que descrevo aqui, embora a argumentação que eu desenvolva se baseie em boa parte em sua análise e interpretação da visão kantiana da razão. Ele argumenta em seu ensaio *Interpretação fenomenológica da Crítica da razão pura de Kant*, que aquilo que chamamos de Universo, isto é, a totalidade da natureza física, não pode ser observado "em seu ser-todo na experiência". Contudo, é preciso situar historicamente essa posição. O livro de Heidegger consiste nas notas do curso proferido durante o semestre de inverno de 1927-8 na Universidade de Marbourg. Heidegger nada mais faz aí que acompanhar a interpretação oficial da ciência na época. Foi somente um ano depois, em 1929, que a comunidade científica viu-se atingida pela maravilhosa descoberta de Hubble e pela correspondente interpretação da existência de um processo global de expansão do Universo. Só então os cientistas puderam apresentar razões teórico-observacionais suficientemente fortes para opor, à interpretação da metafísica, a explicação científica, na cosmologia, das propriedades da totalidade Universo. Aí a totalidade Universo passou a ser o objeto de uma ciência.

Ao não acompanhar o desenvolvimento da ciência e, por conseguinte, deixando de rever sua afirmação que se tornara incompleta e ultrapassada pelas descobertas astronômicas, Heidegger deixou de adequar sua descrição da cosmologia aos novos tempos. Um filósofo tão consciente das ontologias e que pretendia estabelecer o lugar da *physis* deixou-se envolver por essa definição e argumentou que a cosmologia racional e a teologia racional formam, juntamente com a psicologia racional, um trio que delimitava os territórios que sempre foram e sempre serão impenetráveis para a ciência, os territórios das "totalidades". A cosmologia trataria da totalidade do mundo, a teologia racional, de Deus, e a psicologia racional, da totalidade da alma (e a metafísica da totalidade do ser). Posto desse modo, as sentenças e afirmações emitidas na cosmologia não deveriam nunca ser associadas a um conhecimento científico.

De modo curioso, essa atitude, da parte de um filósofo, encontrou durante muito tempo, ao longo da segunda metade do século XX, parceria entre os físicos, através de uma mesma e única argumentação: a impossibilidade da observação de alguma propriedade global envolvendo diretamente a totalidade do mundo.

3. Por outro lado, não devemos perder de vista a razão que conduziu a essa particular estratégia dos cientistas e que provocou a redução dos atributos da cosmologia. Alguns cosmólogos, ao aceitarem essa redução — ou até mesmo sem a aceitar totalmente —, procedem assim por considerá-la nada mais que uma estratégia para produzir conhecimento, sem necessidade de penetrar as intrincadas questões que envolvem o estabelecimento de seus fundamentos. Entretanto, embora a estratégia possa ser usada em algumas situações — e, efetivamente, tem sido usada com sucesso em diferentes momentos pela física —, no caso da cosmologia isso não é possível.

E por que não é possível? Por que devemos esquecer essa estratégia ao nos envolver com a cosmologia e tentar examiná-la como algo mais que a física? Por que não deixar essa tarefa para mais adiante, quando nossos conhecimentos sobre o Universo se tornarem mais sólidos e mais completos? A razão é a mesma a que me referi anteriormente quando falei da física newtoniana e sua atitude absolutista: postergar essa ação nada mais é que estabelecer uma armadilha para fixar e impor, uma vez mais, um pensamento hegemônico sobre o mundo.

¹ Maurice Merleau-Ponty, “Discurso editorial”.

² O cenário inflacionário serviu bastante bem a essa ideologia, produzindo limites formais às quantidades observáveis e expulsando a questão da origem do Universo para fora do centro da cosmologia.

³ Mário Novello, *Cosmos et contexte*.

1. Cosmologia segundo Einstein

O primeiro movimento que permitiu, no início do século XX, o estabelecimento de uma nova cosmologia é simbólico: Einstein argumenta que a aplicação da então recém-construída teoria da gravitação ao Universo deve ser modificada. Interessam-nos menos aqui as razões que listava em apoio a essa alteração e mais a própria forma que utilizou para realizá-la. Pois o que estava em jogo — e o que estará constantemente em jogo, desde então — era saber se a cosmologia gera uma novidade tão completa a ponto de impor a alteração das leis da física quando aplicadas ao Universo. Essa é a questão que os primeiros cosmólogos colocaram e que ficou desde então pendente. Qualquer resposta que lhe seja dada marca, sem dúvida, uma decisão sobre a natureza do olhar da ciência sobre o mundo.

Antes de empreendermos essa análise, é necessário fazer um pequeno desvio para nos armarmos de instrumentos necessários para compreender a questão. Precisamos responder a algumas indagações que estão em nosso caminho e que não podemos evitar. A primeira delas pode ser formulada diretamente, a propósito de uma afirmação que fizemos antes. Assim, é colocada a questão: *por que podemos afirmar que uma teoria da gravitação fundamenta uma cosmologia?*

Antes de levar adiante a análise das ideias cosmológicas de Einstein, de entender as propriedades dessa modificação e as consequências que ela provocou, cabe também perguntar: por que teve ele o direito de fazer isso? Por que pôde construir um modelo capaz de descrever a totalidade a partir de sua nova teoria da gravitação? Ou por que somos levados a aceitar que uma modificação da descrição dos fenômenos gravitacionais, que a construção de uma nova teoria da gravitação, permite fundar uma cosmologia? Por que não podemos dizer, por exemplo, que uma modificação na descrição de fenômenos eletromagnéticos cria uma nova

cosmologia? Por que o conhecimento das forças nucleares não cria uma cosmologia?

Essas perguntas admitem uma mesma resposta simples que, contudo, não as esgota completamente. Vamos aqui tratar somente de uma resposta imediata, deixando para outra oportunidade uma análise mais completa. Encontramos essa resposta simples na própria caracterização e divisão das forças que existem na natureza.

As diferentes forças do mundo

Um dos grandes sucessos da física no século XX foi a unificação de todos os processos, da dinâmica de todos os fenômenos a partir de uma combinação de apenas quatro forças fundamentais. Não deixa de ser notável a eficiência dos físicos na demonstração de que todos os processos do mundo observável que fazem parte de seu território de competência podem ser explicados como consequência da luta entre quatro e somente quatro forças fundamentais: a força eletromagnética, a força gravitacional, a força nuclear fraca e a força nuclear forte.

Há vários modos de distinguir essas forças e classificá-las. Vamos nos limitar aqui a dois modos de classificação, suficientes para responder à pergunta que nos interessa. Para realizar essa divisão devemos nos concentrar em duas propriedades: o alcance e as respectivas intensidades dessas diferentes forças.

A física anterior ao século XX, que, genericamente, se costuma chamar de física clássica (querendo com essa terminologia explicitar que ela é não relativista e não quântica), conhecia somente forças de longo alcance: as forças gravitacionais e as eletromagnéticas. Com isso, entende-se que seus efeitos se estendem por todo o espaço conhecido, uma região tão grande que se tende a afirmar, simplificadamente, que ela possui alcance infinito, ou melhor, sem limite sensível. Não há evidência alguma de que exista uma distância-limite, um raio crítico para além do qual essas forças não se fariam sentir, a partir do qual não teriam mais ação efetiva sobre os corpos.

Além dessas duas, no interior da matéria, no nível atômico e mesmo mais intimamente, no nível intra-atômico, duas novas forças foram reconhecidas e receberam os nomes de forças nucleares fraca e forte. A primeira é responsável pela desintegração da matéria, e a segunda por sua estabilidade e persistência. Essas são forças de curto alcance, de dimensões extraordinariamente pequenas, imperceptíveis para nossos sentidos; se fazem sentir apenas no mundo microscópico, no interior dos átomos. Essa propriedade das forças nucleares está relacionada ao fato de que as partículas que servem como intermediárias nessas interações possuem

massa diferente de zero. Em verdade, pode-se mostrar que o alcance de uma interação é inversamente proporcional à massa da partícula trocada.

Segundo o modo moderno, ou melhor, quântico, de interpretar e/ou explicar o fenômeno da interação — aquilo que, tradicionalmente, chamávamos de "força" entre dois corpos —, tudo se passa como se os corpos trocassem partículas muito leves e típicas de cada interação ou força. O caráter misterioso que revestia o conceito de "força" foi, assim, substituído pela nova forma encontrada para descrever a interação: a troca de um número de agentes ativos, os "emissários da interação", ou os *quanta*, isto é, os grãos de energia da "força" correspondente. Para quem não é físico, isso pode parecer igualmente misterioso, mas devemos reconhecer que foi um progresso na descrição de como se dá de fato a interação, ao se visualizar, por meio da troca energética dos quanta da interação, o efeito da ação de uma força sobre um dado corpo.

Essa construção levaria a se esperar, por exemplo, que o fóton, encarregado de transmitir a interação eletromagnética, tivesse massa nula. Quanto à gravitação, a situação é um pouco mais complexa. Em um primeiro momento, e de modo simplista, poderíamos afirmar que, dado seu caráter de força de longo alcance, como a eletromagnética, os grãos elementares (que chamamos de "grávitons") também deveriam ter massa nula. Deixaremos essa questão para examinar adiante, quando analisarmos as propriedades da constante cosmológica. Do que vimos, podemos fazer o seguinte quadro representativo da hierarquia das forças:

Forças de longo alcance	Forças de curto alcance
Eletromagnética	Nuclear forte
Gravitacional	Nuclear fraca

Outro modo de caracterizar e realizar um ordenamento das forças é lançar mão do conceito de intensidade. Em situações semelhantes essas forças produzem, como resultado de suas respectivas ações, respostas distintas. É possível identificá-las por certas constantes fundamentais que constituem a impressão digital de cada uma delas. Para cada força existe um correspondente valor da constante que determina a diferença de suas intensidades. Com esse critério pode-se elaborar uma segunda ordem

hierárquica que vai da mais forte para a mais fraca: nuclear forte — nuclear fraca — eletromagnética — gravitacional.¹

Universalidade da força gravitacional

A força gravitacional é a mais fraca interação conhecida. Só para dar uma ideia disso, entre duas partículas de mesma carga e mesma massa — por exemplo, dois elétrons —, a força gravitacional é, aproximadamente, da ordem de 10^{-40} vezes mais fraca que a eletromagnética. Por que, então, ao tratarmos da questão cosmológica, é por essa força que começamos a análise, é a partir dela que estruturamos um modelo cosmológico? Por que podemos afirmar que uma nova teoria da gravitação funda uma cosmologia?

A resposta vem das propriedades das forças. As forças nucleares são de curto alcance, da ordem das dimensões do átomo. É razoável aceitar que, qualquer que seja a definição de cosmologia que consideremos, ela deve tratar de grandes dimensões de espaço e de tempo. Assim, forças localizadas certamente não deveriam desempenhar papel importante ao longo de sua história.²

Sobram as duas forças de longo alcance. O eletromagnetismo tem a propriedade de admitir forças de sinais opostos, isto é, que podem ser atrativas ou repulsivas, dependendo das características dos corpos que interagem segundo esse modo. Em um Universo composto de corpos neutros, como átomos e radiação, as diferentes ações eletromagnéticas se cancelam, eliminando qualquer papel importante que a força poderia desempenhar, pelo menos em condições convencionais, no Universo.³

Embora seja a mais fraca de todas, a força gravitacional é universal, ou seja, tudo que existe sente a força gravitacional. Não existe nenhum corpo material ou energia que não seja influenciado por um campo gravitacional — nem mesmo a própria energia gravitacional. Ademais, ela tem outra propriedade notável, a chave para entender a questão que colocamos: ela é somente atrativa. Não existe repulsão gravitacional, não existe massa negativa na natureza. Assim, mesmo sendo a mais fraca, essas duas propriedades — universalidade e atração sempre positiva — determinam a

importância maior da força gravitacional sobre as demais quando se trata de pensar grandes porções de espaço-tempo ou até mesmo a totalidade do mundo que chamamos de Universo. Torna-se então compreensível a afirmação de que uma teoria da gravitação funda uma cosmologia.

Teremos oportunidade de nos deter mais longamente nessa questão, mas, para uma primeira compreensão do problema, é preciso esclarecer desde logo as razões que levaram ao afastamento da cosmologia newtoniana. Para isso precisamos entender por que, ao produzir uma aplicação formal de sua nova teoria da gravitação, Einstein se voltou para o Universo. Há aí um duplo movimento de ideias que devemos entender. Por um lado, a aplicação de uma teoria da gravitação ao Universo aparece como natural e necessária. Natural, posto que não se conhece nada que escape a essa força; e necessária, para evidenciar a coerência interna da nova teoria, a relatividade geral, e seu contato com o resto da física.

O objeto da cosmologia

A cosmologia aparece, para Einstein, como a aplicação formal necessária de sua teoria da gravitação a uma *totalidade* que parecia (e para sempre) inobservável. Essa questão impediu, durante um longo tempo, a caracterização da cosmologia como ciência. Embora a descoberta de Hubble, de que o Universo está em expansão, date do final dos anos 1920, foi somente em 1964, graças à descoberta da radiação de 2,7 graus Kelvin a preencher todo o Universo, que a cosmologia passou efetivamente a ser considerada ciência. Até essa data, prevalecia na comunidade científica a argumentação de que o objeto da cosmologia — o Universo — não era observável. Como se poderia medir alguma propriedade do *todo*? Qualquer experiência, toda observação, é sem pré-limitada no espaço e no tempo, argumentava-se. Assim, não poderíamos nunca observar esta totalidade que chamamos de Universo.

Curiosamente, mesmo depois da aceitação de que a observação feita por Hubble, em 1929, de que certas medidas astronômicas garantiam a afirmação de que o Universo estava em expansão, os cientistas ainda não consideravam suficiente a experiência de Hubble para concordar que a totalidade Universo poderia fazer parte de observações convencionais. Em verdade, foi somente quando a *cosmologia física* se institucionalizou, nos anos 1960, que a cosmologia passou a ser considerada ciência por parte do *establishment* científico.

O Programa Cosmológico de Einstein

A tradição científica exige que as observações sejam descritas como uma luta contínua entre diferentes processos inertes que restariam como tal, eternamente, no mesmo estado, não fosse a presença de forças que destroem o equilíbrio. O princípio de inércia possui grande força formal e marcou profundamente o pensamento da física. Processos e eventos, a realidade não trivial, sua diferenciação do vazio têm sido acompanhados pelos físicos com uma racionalidade que torna indispensável algum tipo de força na origem de uma ação, de qualquer processo físico. Devemos então prever uma força universal que, agindo sobre tudo o que existe, ou melhor, sobre tudo aquilo que caracterizamos como "o Universo físico", produz, organiza, direciona esse Universo. Na caracterização das forças conhecidas, esse papel é desempenhado pela força gravitacional. Desse modo, pela universalidade dessa força, foi-se levado a identificar o Universo como Universo gravitacional.

O Programa Cosmológico de Einstein se baseia fundamentalmente em dois princípios. Há também, associada a eles, uma orientação, um quase-princípio menor, não identificado como tal, mas que possui a aparência de uma indagação sub-reptícia que está na origem de toda questão cosmológica. Vamos enunciar esses elementos não do modo como foram originalmente apresentados, mas como, ao longo do tempo, adquiriram seu significado atual e são descritos hoje.

Princípio da universalidade

O primeiro princípio, talvez o mais fundamental, consiste na afirmação de que o ator fundamental no cenário cosmológico é a força gravitacional. Isso nos leva a descrever o Universo gravitacional como simplesmente o *Universo*. As razões da hierarquia das forças da natureza servem de apoio a essa hipótese, e, por isso, não iremos nos estender mais nesse tema. Precisamos então passar à etapa de organização de sua descrição, o que é garantido por outro princípio fundamental.

Antes de enunciarmos esse princípio e passarmos à sua análise, podemos perguntar por que vamos buscar em um princípio — e de interação — o terreno sobre o qual construir uma cosmologia. A razão tem natureza histórica, mas é importante fazer dois ou três comentários a respeito.

Desde a época em que Newton elaborou a universalidade do conceito de força gravitacional, os físicos reconheceram sua associação a uma ação instantânea e universal. Essa descrição só pôde ser sustentada até o começo do século XX, antes da revolução produzida por Poincaré, Lorentz, Einstein e outros, pois tal propriedade é incompatível com a relatividade especial, que não admite propagação maior que a da luz. A incompatibilidade entre essa teoria, por um lado, e, por outro, a existência de processos gravitacionais foi resolvida por Einstein ao instituir a hipótese de que a característica da força gravitacional permite sua identificação com a geometria do espaço-tempo, e sua dinâmica é dada pelas equações contidas na teoria da relatividade geral. Essa sentença contém duas afirmativas. A primeira diz respeito à identificação da gravitação com a geometria do mundo; e a segunda trata da dinâmica que deve ser atribuída a essa geometria.

A universalidade da gravitação é uma condição básica indispensável para uma descrição em termos geométricos. Com efeito, como poderíamos falar da associação da gravitação a uma estrutura única — o espaço-tempo — se a geometria do mundo não fosse única e universal? Mas podemos nos perguntar se a interpretação geométrica não é somente isso, uma interpretação. Em outros termos, seria possível descrever os processos gravitacionais sem fazer apelo à geometrização?

Antes de responder, vamos refletir um pouco sobre as consequências que podemos atribuir à resposta. Consideremos o caso em que ela é positiva. A geometria do mundo não seria determinada pela força gravitacional. Mas, se a gravitação é a mais universal das forças, então, quem determinaria a geometria do mundo? Ou não haveria uma só geometria no mundo? Seria possível imaginar que a geometria do mundo estivesse associada a cada processo em particular, e não impressa, cunhada na estrutura fundamental do espaço-tempo? E, se isso fosse verdade, que sentido poderíamos atribuir à geometrização da gravitação? Ela não seria mais, então, que um modo

conveniente e especial para descrever propriedades especiais dessa força — nada mais que isso.

Falar de uma geometria deveria corresponder a determinar a estrutura causal do mundo. Tal associação, iniciada pela relatividade especial e ampliada pela relatividade geral, parecia uma certeza fundamental da física. Entretanto, ao final do século XX, a interdependência entre geometria e estrutura causal começou a ser posta em questão. A razão é simples e está ligada a análises de processos não lineares referentes a teorias de campo — em particular, ao campo eletromagnético — que permitem estabelecer novidades na propagação causal, aspectos ausentes das teorias lineares. A partir dessa mudança causal, é possível associar uma multiplicidade de geometrias ao mundo, pondo por terra aquela univocidade que tanto atraiu os cientistas ao longo do século XX. É bem verdade que há uma diferença de gradação nas diversas formas de atribuir uma geometria ao mundo. De qualquer modo, a perda do caráter unívoco e universal da geometria do espaço-tempo, ao ceder lugar para uma miríade de geometrias de diferentes ordens e regimes, parece estar levando para um lugar menos nobre da ciência a própria ideia de univocidade do mundo, ou, para ser mais rigoroso, sua estrutura causal.⁴ Mas essa não é nossa questão. Devemos aqui voltar à pergunta: ao identificar a gravitação com a geometria, Einstein encontrou o único modo de representar essa força? A resposta é técnica e envolve um longo caminho que iremos descrever muito brevemente. Para o que nos interessa, é suficiente nos limitarmos às considerações feitas por vários cientistas ao longo dos anos 1950.

Gravitação: geometria ou campo?

A relatividade geral foi construída a partir de um enfoque geométrico. Uma intuição e um conhecimento profundo de alguns fundamentos que servem de base aos processos gravitacionais conduziram Einstein, na segunda década do século XX, à teoria na qual a gravitação se identifica com a geometria do espaço-tempo. Quarenta anos depois, diferentes cientistas — Sen Gupta, Richard Feynmann e outros — mostraram como é possível seguir um caminho alternativo na descrição dos mesmos processos, sem fazer apelo direto a modificações na geometria. Mostrou-se que a geometrização da força gravitacional é uma representação dessa força, mas não a única.

Seguindo a argumentação apresentada pelo físico indiano Sen Gupta, podemos resumir a descrição alternativa, não geométrica, da teoria de Einstein. Começamos por notar que todas as demais interações — exceto a gravitação — são descritas tendo como arena o espaço-tempo plano, sem qualquer curvatura, chamado espaço de Minkowski. Assim, por que não tentar uma descrição semelhante, isto é, pensar também a força gravitacional como um campo de interação que se propaga sobre o mesmo espaço? A fonte do campo seria a matéria sob qualquer forma — matéria ponderada, radiação —, e a intensidade da força dependeria da distribuição de energia da fonte.

Ora, a gravitação também contém energia. E como toda forma de energia produz gravitação, a própria energia gravitacional deve ser fonte de gravitação, modificando as propriedades desse campo de interação, suas características e intensidade, em nada se assemelhando às outras forças, como a eletromagnética, por exemplo. A fonte do campo eletromagnético é formada por cargas elétricas em repouso ou em movimento. O campo eletromagnético possui energia (pois existe!), mas não possui carga elétrica. Consequentemente, é possível dizer que o campo eletromagnético é linear. Não há nenhuma inconsistência de princípio entre a existência do campo eletromagnético e sua incapacidade de interagir consigo mesmo.

O caso gravitacional é positivamente diferente. É fácil entender a razão da distinção examinando suas fontes, isto é, o modo pelo qual esses campos são criados. Como o campo gravitacional tem por fonte qualquer forma de energia, é fácil compreender que a energia do próprio campo gravitacional — precisamente a que lhe dá existência, realidade — deve ser também causa de geração de campo gravitacional. O processo que garante que a força gravitacional seja determinada pela energia presente em uma dada região do espaço-tempo leva à necessidade de incluir a própria energia gravitacional como fonte de si mesma. Chega-se, assim, a um processo em cascata: a gravitação gerada por uma dada energia — sob qualquer forma — possui também energia que gera gravitação, que também possui energia, que gera gravitação, e assim sucessivamente.

Vários físicos, entre os quais, em particular, Sen Gupta e Richard Feynman, mostraram que é possível entender essa série infinita de autoprocesso, de autoexcitação continuada de energias que se sobrepõem, por meio de uma propriedade notável: a de ser somável. Ela admite um tratamento matemático capaz de compactar toda a infinitude em um formalismo único. Quando se soma essa série, aparece um resultado maravilhoso: a soma total tem um efeito formal, matemático, equivalente ao que se obteria se admitíssemos *a priori* que a força gravitacional tem a propriedade de modificar a estrutura da geometria do espaço-tempo! E mais: como a gravitação não pode ser *desligada*, a geometria do espaço-tempo plano, sem curvatura, a estrutura métrica de Minkowski, se torna, dessa maneira, inobservável. Ou, no melhor dos casos, é uma aproximação da verdadeira geometria do mundo naquelas situações particulares em que a intensidade da força gravitacional é muito fraca.

Isso significa que, ao contrário do que ocorre com a força eletromagnética, que é linear e possui dois sinais, a gravitação não é controlável e pode ser identificada com a alteração, ou melhor, com a determinação da geometria do espaço-tempo. Em resumo, o modo geométrico de representar a interação gravitacional é somente uma possível descrição da realidade, mas não a única.

Essa dualidade não é uma dificuldade, mas aponta no sentido da riqueza conceitual que possui, quer no que chamaríamos de modo geométrico de representação, quer no modo de representação de campo. Cada um deles

possui vantagens formais que devem ser consideradas em cada caso, em cada análise. Notemos, entretanto, que eventuais alterações da dinâmica da gravitação tornam-se sem dúvida uma questão mais séria. Qualquer que seja nossa descrição — geométrica ou de campo —, a dinâmica deve estar determinada e deve ser a mesma.

Cabe reconhecer o começo da dificuldade já no próprio Einstein, pois ele produziu duas equações distintas para a gravitação, conforme estejamos tratando de processos na Terra, em nosso sistema solar e vizinhanças, ou queiramos descrever forças gravitacionais entre galáxias e mesmo além delas, no que chamamos de processos cosmológicos.

A essa dificuldade original vieram se juntar outras. A razão para isso está precisamente relacionada à fraqueza do campo gravitacional em nossa vizinhança e à necessidade de considerar campos fortes, muito intensos, para descrever processos de natureza cosmológicos e que estão fora do controle operacional. Para nossa análise, não precisamos entrar nos detalhes das propostas de alteração das equações da relatividade geral ainda hoje examinadas.

Princípio temporal

Einstein pensa o tempo como uma incógnita impossível de ser aprisionada dentro de um programa coerente da física. Desde seus primeiros estudos cosmológicos, está convencido de que a única possibilidade de produzir um modelo de Universo que não se envolvesse em dificuldades insuperáveis com questões conceituais do tempo requer — e, mais que isso, exige — a eliminação do tempo. Optou assim por produzir um Universo completamente homogêneo, no qual a aparência local é a mesma em todos os lugares. Ademais, à semelhança dessa estrutura espacial (que envolve igualmente a ausência de condições assintóticas), impôs a condição de que também não houvesse qualquer referência envolvendo o tempo. Tratava-se, por conseguinte, de eliminar, em sua descrição do Universo, qualquer dependência local, fosse ela espacial ou temporal.

Nesse primeiro momento de construção da nova ciência — a cosmologia —, era indispensável que a ela fosse atribuída uma função singular, uma

posição privilegiada que a distinguisse claramente das descrições convencionais dos processos que a física está acostumada a fazer. O caráter especial da ciência então nascente deveria ter como função primeira e imediata a substituição dos absolutos newtonianos que haviam orientado a ciência dos últimos séculos. E, no entanto, não foi isso que sua prática exibiu.

Depois da tarefa grandiosa de ajudar a fazer uma revolução — a teoria da relatividade especial —, ao relativizar os processos físicos, propagando a universalização dos observadores inerciais e indo mesmo um passo além — com a relatividade geral — na tentativa de eliminar completamente qualquer especificidade de um observador em sua indagação, observação e descrição da realidade física, Einstein reconhece ter auxiliado na produção e elaboração de um movimento de ideias que havia culminado na eliminação dos absolutos newtonianos — em particular, o espaço e o tempo absolutos. Esse movimento, contudo, teve também como consequência importante a criação de um vazio no nosso imaginário, em nossa representação do mundo.

Para preencher esse vazio e produzir sentido integral e completo à teoria da gravitação, Einstein volta seu olhar para o Universo. Deixa de pensar as consequências dessa teoria sobre processos envolvendo o sistema solar; larga de lado, por momentos, a crítica comparativa com o sistema newtoniano, para a vizinhança da Terra, e se lança ao exame do Universo como um todo. É ali que sua teoria deveria passar pelo teste de coerência interna, preparatório para a prova de compatibilidade observacional. Esse foi o teste de coerência que escolheu submeter sua teoria da relatividade geral.

Para realizar essa tarefa, precisa de um princípio que lhe sirva de guia, capaz de orientá-lo na busca de uma geometria para o Universo que satisfizesse suas equações de evolução do campo gravitacional. Começa por reconhecer no princípio de Copérnico, em seu sentido mais abrangente — *não ocupamos posição privilegiada no Universo* —, o único guia externo à sua teoria que não produzia efeitos indesejáveis. Curiosamente, o apelo ao princípio de Copérnico indica o lugar natural no arcabouço formal que Einstein organiza, por onde apareceriam novos absolutos que iriam

substituir, no pensamento científico, o papel representado pelos apriorismos newtonianos. E quais são eles?

O primeiro passo na nova ordem demanda a descrição da geometria do mundo distinta da que fora estabelecida na relatividade especial, isto é, a geometria de Minkowski. Ora, para descrever a geometria do Universo, é necessária uma escolha antecipada de um sistema de coordenadas. Isso significa, de imediato, em termos práticos, uma escolha do tempo. Einstein decide que a escolha deve estar o mais próximo possível do cenário absoluto newtoniano, que o tempo devia ser universal, único para toda a classe de observadores privilegiados em repouso com a matéria existente no mundo. Essa escolha lhe parece indispensável, e ela substitui, no imaginário coletivo, a estrutura absoluta perdida.

Einstein postula, então, como princípio, que se deveria escolher uma classe particular de observadores privilegiados, possuindo relógios que exibissem uma sincronização absoluta de toda matéria do mundo, em todas as partes. De outro modo, como encontrar argumentos que explicassem um ritmo distinto, um passar dos tempos que dependesse do observador, que exibisse uma disritmia entre suas partes? Reconhecemos nessa escolha um bom princípio,⁵ que, embora apareça mascarado em seu modelo (por ser estático), iria constituir o elemento mais sólido, mais universalmente aceito de toda a cosmologia futura. A tal ponto isso é verdade que o único modelo cosmológico posterior que não admite uma sincronização absoluta, essa escolha universal de descrição temporal — o modelo de Universo proposto e elaborado em 1949 pelo matemático austríaco Kurt Gödel —, foi tratado por todos, em particular pelo próprio Einstein, como uma curiosidade, um defeito mesmo da teoria da relatividade geral, capaz de permitir essa indesejável deformação formal do tempo.

O terceiro pilar sobre o qual Einstein ergue a cosmologia tem uma componente menos técnica, menos formal, um caráter apriorístico que a distingue das outras. A bem da verdade, não deveria sequer ser considerada como um verdadeiro princípio, mas sim como uma crença escondida. Curiosamente, ela pode ser formulada como uma questão e estará no centro de nossa discussão. Não somente é a mais fundamental de todas, é ainda extremamente atual. Assim, a questão que se coloca é: *a física é suficiente*

para explicar nosso Universo, ou existem propriedades novas, específicas da cosmologia?

Essa é a pergunta com que se inaugura a cosmologia moderna, e é ainda a questão que temos pela frente. A que se deve tal persistência? Por que essa indagação pode, ainda hoje, resistir a uma resposta direta, pronta e definitiva?

Antes de entendermos o problema — que, como veremos, é fonte de uma definição aceitável do que é cosmologia —, devemos fazer um primeiro e breve balanço sobre seu status ao longo da história.

A primeira resposta dada por Einstein a essa pergunta é um sonoro não. A partir dessa resposta ele ergueu seu cenário cosmológico. Entretanto, quase em seguida, rejeitou essa solução. A rejeição tem uma componente técnica e outra ideológica. A primeira se apoia na instabilidade do modelo proposto por Einstein, enquanto a segunda está relacionada à descoberta do cientista russo Aleksandr Friedmann de que cenários cosmológicos mais estáveis, não estáticos, são permitidos pelas duas teorias da gravitação que Einstein havia proposto. Friedmann liberava os cientistas, assim, da obrigação de aceitar a hipótese de existência de novas forças de natureza global, capazes de serem observadas somente na cosmologia. Para examinar essas alternativas, contudo, é preciso entender um pouco melhor o primeiro modelo cosmológico.

¹ Na década de 1990, sugeriu-se a possibilidade de haver uma quinta força. Até hoje, quando escrevo estas notas, não existe indício convincente de que ela exista. Assim, há fortes evidências de que devemos aceitar o modelo padrão de que só existem essas quatro forças.

² Embora elas certamente devessem ser incorporadas em uma discussão completa da cosmologia, em particular na cosmogonia, isto é, do exame da substância material existente no Universo.

³ O campo eletromagnético tem um importante papel na cosmologia pelos efeitos gravitacionais que a distribuição de energia transportada por esse campo exerce sobre a curvatura do espaço-tempo, isto é, sobre a evolução da gravitação. Ele pode estar na origem das alterações de comportamento do Universo na vizinhança do ponto de condensação máxima e ser o principal responsável pela ausência de uma singularidade inicial (ver curso que ministrei na V Escola Brasileira de Cosmologia e Gravitação, em www.icra.cbpf.br).

⁴ Ver, em particular, Mário Novello *et al.*, *Physical Review D*, 2000.

⁵ Tal sistema de representação das coordenadas havia sido descrito no século XIX pelo matemático alemão Carl Friedrich Gauss. Teremos oportunidade, mais adiante, de comentar a origem e extensão desse sistema chamado gaussiano.

2. O modelo cosmológico de Einstein

Deixando as estruturas absolutas para trás?

A física newtoniana organizou um mundo formal baseado em estruturas absolutas, eternas, sem evolução. Não deixa de ser curioso perceber que ela mantinha um status científico elevado graças precisamente a esse caráter absoluto. Ao final do século XIX, esse programa começou a ruir e abriu espaço para uma visão que teve uma reforma profunda, retirando da física newtoniana o caráter absoluto, inibindo essa condição primordial de sua formulação. Entretanto, dizer que os cientistas do século XX abandonaram a tradição de sustentar o discurso científico sobre o mundo a partir de conceitos absolutos é somente parte da verdade. Com efeito, desde a elaboração do primeiro modelo até as mais recentes propostas de cenários cosmológicos, alguns daqueles conceitos não somente são tolerados como fazem parte importante dessa descrição. Em apoio a essa afirmação, podemos recorrer a dois exemplos bastante claros e eloquentes. São eles a questão da constante cosmológica e a aceitação da existência de um tempo cósmico.

No apêndice à segunda edição de *O significado da relatividade*, de 1948, Einstein formulou um problema que desde então povoa os centros de ciência de todo o mundo e permanece ainda sem resposta. Com um cuidado muito especial, simbólico de uma época passada, e tentando não produzir nova especulação em um território do pensamento identificado como possuidor de uma dose excessiva de considerações de caráter apriorístico, argumentou ele: "Aceitando a hipótese — sustentada pela observação — de que existe uma densidade média de matéria em todo o Universo, colocamos a questão: pode essa hipótese conciliar-se com a teoria da relatividade geral?"

Aqui nos interessa menos a solução apresentada que a própria questão, bem como o novo método que Einstein indicou para produzir sua resposta. A análise que ele faz, construída dentro dos cânones da ciência, é tão perfeita e segura que não levanta, à primeira vista, qualquer suspeita de seu alcance e de como ela permitiu que Einstein desenvolvesse seu pensamento. Parece que estamos em face de uma dessas questões triviais, comuns, que deve ser resolvida dentro da especificidade técnica em que foi formulada. Entretanto, uma reflexão mais aprofundada nos leva a duvidar disso e a indagar se, ao contrário, não estaríamos em presença de uma ruptura de enormes consequências para a tradição dessa ciência, envolvendo a possibilidade grandiosa e crítica de uma tentativa de refundação da física.

Começamos por perguntar: por que Einstein coloca sua teoria da relatividade geral à frente da hipótese sobre o conteúdo material no Universo? Ele mesmo nos responde com sua proposta de modelo cosmológico que consiste na produção de um sistema global fechado, eterno, sem evolução. Mas esse sistema idealizado não emerge naturalmente de sua teoria original da gravitação. Não sai dela, não constitui sequer uma possibilidade de solução aceitável. Ao contrário, o sistema aparece, à primeira vista, como impossível de ser compatibilizado com suas equações. Isto é, as equações da relatividade geral não são nem mesmo compatíveis com as propriedades que Einstein atribui — *a priori* — ao Universo!

Uma nova propriedade global

O que faz Einstein? O que podemos esperar que tenha feito um cientista que alcançou um papel tão alto na ciência — e que, entre suas conquistas, incluiu um momento tão importante quanto o de ter modificado as equações que governavam, desde o século XVII, a dinâmica dos fenômenos gravitacionais — ao deparar com tal incompatibilidade? Creio que é aceitável imaginar que a atitude convencional do cientista consistiria em rejeitar suas ideias preconcebidas e começar a examinar outras propriedades do Universo que se adequassem mais naturalmente às suas equações.

Esse caminho simples e sem conturbações não foi o escolhido por Einstein. Ao contrário, ele achou conveniente, necessário e, mais que isso,

indispensável alterar as equações originais que havia estabelecido em sua teoria da relatividade geral para torná-las compatíveis com sua visão apriorística do Universo. Essa visão, para ele, era a única apta a introduzir uma interpretação racional aceitável no interior do quadro de ideias científicas dominante no século XIX, posto que eliminava qualquer dependência temporal, ou melhor, qualquer referência temporal de sua descrição.

Esse passo ousado — a modificação das equações originais da relatividade geral — é ao mesmo tempo uma solução admirável do ponto de vista técnico, e mostra claramente que o legado deixado pelos séculos anteriores não havia sido de todo ultrapassado por Einstein. Afinal, ele não conseguiu, naquele momento, despojar-se dele, nem auxiliar em sua superação. Ao contrário, selecionou no passado ideias sobre o Universo que considerava sólidas, independentes da particular descrição matemática que a ciência pudesse oferecer, e colocou-as no lugar onde os apriorismos newtonianos haviam reinado, soberanos. Em sua crítica, em vez de induzir à eliminação daqueles apriorismos, optou por uma substituição, uma simbólica troca de absolutos. Einstein executava, assim, um duplo movimento: destruição e ao mesmo tempo renovação dos absolutismos. Pretendia eliminar os apriorismos herdados da linhagem newtoniana ao longo dos séculos e ir até mesmo além, abandonando a herança da geometria de Euclides; mas, a um só tempo, não deixava esse lugar especial vazio: ocupava-o com outras ideias absolutas sobre a descrição racional do Universo.

Poderíamos entender seu movimento como estratégia para produzir uma nova hegemonia, com base em um pensamento global e coletivo, recuperando assim a simplicidade a que o cenário newtoniano nos havia acostumado. Seria essa a explicação para o sucesso do estranho caminho que Einstein decidiu usar?

Independentemente disso, devemos ainda entender que foram essas ideias que iriam constituir a base do modelo einsteiniano e que exemplificam de modo bem nítido seu Programa Cosmológico. Dentro da prática convencional da atividade racional da ciência, o modelo de Universo que Einstein produziu deveria aparecer como exemplo comum de uma teoria da gravitação, e não como exercício invulgar da reunião de processos que não

estão sob o controle observacional. Ao ser obrigado a escolher entre aceitar um modelo de Universo que não correspondia às suas ideias preconcebidas, ou considerar a possibilidade de que existissem processos ainda não observados a exigir uma profunda mudança do arcabouço teórico da física, Einstein adotou a segunda opção.

Ato contínuo, propôs uma mudança de orientação na teoria da relatividade geral para adequá-la ao que denominava *a questão cosmológica*. A nova teoria deveria ter estrutura igual à da anterior com relação a processos locais, na Terra, no sistema solar e em suas vizinhanças; e deveria se afastar daquela somente no referente às questões cósmicas. O momento mais grandioso dessa posição, da alteração da teoria da relatividade geral, foi aquele em que Einstein tomou consciência de que a cosmologia não se deve subordinar à física, mas ao contrário. Ele acreditou ser bastante aceitável o aparecimento de novas propriedades da natureza ao tratarmos de extensas dimensões de espaço e de tempo, ou melhor, desta totalidade que chamamos de Universo. Essas propriedades parecem aceitáveis e até mesmo inevitáveis na elaboração de uma cosmologia racional. A opção pela modificação de sua teoria representa o momento em que Einstein propôs o afastamento entre a cosmologia e a física, e, como consequência, o domínio daquela sobre esta. Era chegada a hora de exhibir mais claramente quais eram essas modificações e suas consequências.

A teoria deveria conduzir ao aparecimento de um cenário cósmico coerente e fechado, mesmo que para isso fosse necessário introduzir processos físicos ainda não observados e até mesmo possuidores de propriedades que se chocavam com o conhecimento padrão. Einstein percebeu que não podia subordinar a cosmologia à física. Ao contrário, a primeira deveria fazer o reexame da segunda e possivelmente introduzir novidades na descrição da natureza.

Há vários argumentos que permitem sustentar esse apriorismo na primeira tentativa de considerar questões globais envolvendo o conceito de totalidade. Alguns chegam mesmo a atribuir-lhe uma origem simplesmente técnica, envolvendo a consideração de que a totalidade permitiria eliminar hipóteses sobre as possíveis condições assintóticas do Universo. Como elas não seriam acessíveis à observação, o modo mais simples de contornar essa dificuldade consistiria em eliminar qualquer referência a elas. Isso pode ser

feito do modo escolhido por Einstein: produzindo uma estrutura capaz de limitar o Universo, fechando-o, e, dessa forma, afastando a necessidade de saber quais seriam as condições que determinariam as propriedades longínquas, no infinito, nas fronteiras do Universo. Importa menos aqui a origem desse procedimento, e mais o fato de que Einstein o tenha escolhido. Resta saber quais são as consequências maiores da escolha.

Propriedades básicas do Universo de Einstein

Cabe agora examinar um pouco mais detalhadamente o primeiro modelo cosmológico produzido no interior da modificação da gravitação que Einstein fez em sua teoria original. A esta extensão da relatividade geral — uma nova teoria da gravitação aplicável ao Universo como um todo — chamaremos de RG-2, para distingui-la de sua primeira proposta de teoria, RG-1. A constituição de um modelo coerente do Universo postulado por Einstein exige a distinção e a correspondente caracterização de quatro aspectos fundamentais, sintetizados nos seguintes postulados:

- Existe um tempo cósmico global.
- A geometria do mundo é estática.
- A topologia do mundo é fechada.
- A fonte da gravitação é a totalidade da matéria e energia existente no mundo. Além disso, existe uma força universal de repulsão gravitacional, caracterizada por uma constante de caráter exclusivamente cosmológico, que pode ser desprezada em processos gravitacionais locais.

Vamos examinar cada um dos postulados separadamente.

Tempo cósmico: um resquício do tempo absoluto newtoniano

Para entender a razão pela qual a quase-totalidade dos modelos cosmológicos (exceto um) estruturaram sua representação do Universo a partir de uma separação dessa totalidade em três dimensões de espaço e uma de tempo, é preciso recuar um pouco na história para comentar a teoria especial da relatividade, que antecipou e inspirou a teoria da gravitação de Einstein.

Ao final do século XIX, parecia certo para vários cientistas — como Lorentz, Poincaré e outros — que a noção de espaço absoluto, bem como a

de tempo absoluto, que constituíam até então a base de sustentação da física fornecida pela mecânica, não poderia mais ser mantida. Não cabe aqui expor os detalhes que levaram a essa constatação, mas devemos tecer alguns breves comentários, pois eles reaparecem quando se trata do exame das geometrias efetivas. Gostaria somente de chamar a atenção do leitor para o fato de que existem evidências na física não linear, em particular na eletrodinâmica não linear, de que estamos vivendo hoje, e desde o final do século XX, uma época — no que diz respeito à questão causal — análoga àquela do final do século XIX.¹

Em primeiro lugar, tratava-se de pensar a existência de uma velocidade máxima de propagação de qualquer tipo de informação. A observação de processos eletromagnéticos levou à ideia de que esse máximo era a velocidade de propagação da luz. Em segundo lugar, a existência de observadores privilegiados, os inerciais — associados a corpos materiais que se movimentam livres de qualquer força — vieram substituir o espaço e o tempo absolutos. Passou-se de um espaço absoluto e de um tempo absoluto para uma estrutura solidária, o espaço-tempo absoluto, caracterizada por uma geometria especial, não euclidiana, chamada geometria de Minkowski. O espaço-tempo que substituiu a estrutura absoluta em que todos os processos do mundo se desenrolariam resultou ser ele mesmo uma estrutura absoluta: uma geometria única, universal. Essa estrutura permaneceu vigente até o advento da teoria da relatividade geral, que retirou o caráter especial e absoluto da geometria de Minkowski, fazendo-a depender, em cada ponto do espaço-tempo, de seu conteúdo energético e material.

Entretanto, para descrever a dinâmica dessa geometria, do ponto de vista factual, é preciso fazer uma escolha de sistema de coordenadas. A caracterização da geometria do mundo passa por essa escolha. Não deixa de ser curioso o fato de que precisamente o criador da relatividade — a teoria que se alicerça sobre uma violenta crítica aos absolutismos do espaço e do tempo que constituíam o fundamento da física clássica a partir da mecânica newtoniana —, ao aplicar sua teoria da gravitação para descrever o Universo, tenha proposto uma escolha especial de representação deste Universo na qual é postulada *a priori* a existência de um tempo global. Isso

nada mais é que um modo elegante e sub-reptício de fazer reaparecer o tempo absoluto.

Entretanto, feita a escolha, ato contínuo Einstein exigiu que seu modelo fosse independente desse tempo! Para entender a situação aparentemente conflitante, devemos rever o status desse tempo global, dessa escolha especial feita por Einstein para construir o cenário em que seriam representados os fenômenos do mundo.

Aceitamos, desde o estabelecimento da teoria da relatividade, que um sistema de coordenadas não é *melhor* que outro, mas pode ser mais *conveniente*. Isso significa que, ao fazermos, arbitrariamente, uma particular escolha de representação para denotar os diferentes pontos do espaço-tempo — o que chamamos genericamente de *eventos* ou *acontecimentos* —, o único guia aceitável consiste na simplicidade que a escolha, para cada processo físico, pode exhibir. Dito de outro modo, a escolha depende de cada processo, de suas especificidades, suas simetrias, e não pode ser dado de uma vez por todas, de modo absoluto.

Como a caracterização de um sistema de coordenadas — um quadro formal em que iremos representar todos os eventos — é arbitrária, por que não utilizar a caracterização já bem conhecida dos físicos e que permite formar uma imagem mental simples dos processos e suas evoluções que não se afasta muito da imagem mental do universo newtoniano? Essa escolha aparece como natural e simplificadora. Entretanto, deveríamos ter sempre em mente que tal representação não é imposta pela natureza — como era tratada nos absolutismos da física newtoniana —, mas é uma escolha particular e simples de modo de representação. Não podemos esquecer essa diferença.

O tempo cósmico global com que os cosmólogos representam o Universo, e no qual será examinada sua dinâmica, é uma *escolha* do sistema de coordenadas. Não está incrustado no mundo, não é parte de uma essência da natureza. Ele não passa de um modo conveniente de simplificar a descrição da geometria do espaço-tempo. Se perguntarmos ao relativista se podemos escolher uma representação do mundo que se desenrole em um tempo global, ele responderá, sem hesitação alguma nem qualquer contradição: "Sim!" Em verdade, dirá ele, a única condição para a existência do tempo global consiste na existência de uma estrutura causal

no mundo, isto é, na impossibilidade de existência de processos não causais. Isso leva à pergunta: *por que a escolha de um tempo cósmico requer a causalidade global?*²

Ao descrever a estrutura temporal de uma dada geometria, é preciso escolher uma classe de observadores a partir dos quais a caracterização dos eventos, bem como sua ordenação, será constituída. Isso é feito, em geral, selecionando-se um conjunto de curvas geodésicas, isto é, um conjunto o mais completo possível de observadores livres de qualquer ação não gravitacional, isentos de qualquer força e que estão em repouso com a matéria existente no mundo. Esses observadores têm relógios que são então sincronizados. É precisamente a sincronização que dá sentido à ideia de tempo único e dá origem ao que chamamos de tempo cósmico ou global.

A existência dessa classe de observadores completa, isto é, capazes de cobrir todo o espaço-tempo, sem qualquer região fora da descrição, só é possível — e isso foi demonstrado por matemáticos, como Gauss, Riemann e outros — quando se pode estender globalmente a estrutura causal local. Isso significa, em termos simples e práticos, que, ao caminhar localmente para o futuro (causalidade local), o observador estará sempre se afastando de seu passado (estrutura causal global). Essa sentença pode parecer trivial, mas nem sempre se pode construir uma estrutura dessa natureza, como veremos ao examinar a geometria de Gödel. Sua existência em nosso Universo ainda não foi demonstrada, e ainda hoje não passa de uma eficiente e útil hipótese de trabalho.

Ausência de evolução

Embora a definição de um tempo absoluto seja uma necessidade dentro do Programa Cosmológico de Einstein, ela não conduz, necessariamente, a uma dependência da geometria global com relação ao tempo. Em sua cosmologia, Einstein elaborou um cenário especial no qual a geometria é estática, isto é, não exhibe qualquer dependência temporal.

O modelo de Einstein guarda grande intimidade com o cenário do Universo eterno de Platão.³ Ele é absoluto e, como tal, não pode ter dependência temporal. Para que estado especial deveria ir tal Universo? Por

que teria ele uma dinâmica? Por que razão não teria atingido seu ponto de equilíbrio? Pois é no ponto de equilíbrio que parece residir a origem de qualquer movimento, de toda dinâmica. Atingido esse ponto, quando ele for estável, qualquer processo deve aí ser interrompido. Ele seria o ponto final de um processo, ou, quando instável, seu ponto inicial.

Essa caracterização é genérica e se aplica a todos os fenômenos da natureza descritos por sistemas dinâmicos. Os cosmólogos argumentam que isso também se aplica à totalidade do que existe. Alguns modelos de origem da fase atual expansionista do Universo fazem da análise da instabilidade seu ponto de partida na elaboração de um cenário completo maior.

Independentemente dessa questão fundamental, uma propriedade do cenário cosmológico limita o alcance de sua atuação: a instabilidade. Com efeito, a análise da evolução de pequenas perturbações desse modelo mostrou uma característica indesejável: as pequenas perturbações tornam-se incontrolavelmente — exponencialmente — grandes com o passar do tempo. Isso significa que qualquer flutuação que porventura ocorresse em algum lugar do Universo de Einstein cresceria desmesuradamente, transformando-o em outra estrutura e reduzindo assim a possibilidade de ele permanecer como originalmente foi construído, adquirindo outras configurações que dependeriam de mecanismos aleatórios de perturbação. Essa é uma das propriedades a determinar que esse modelo não pode ser considerado um bom cenário do Universo.

Por outro lado, os cosmólogos descobriram que a origem da instabilidade elevada reside precisamente em sua quietude original, posto que, mais adiante, mostrou-se que os cenários cosmológicos dependentes do tempo, que não possuem sempre a mesma configuração, não são tão instáveis, exibindo uma propriedade notável, graças à sua dependência temporal: a expansão do Universo diminui sua instabilidade, a dinâmica pode conter um fator de estabilidade.

O mundo é fechado?

Há uma questão à qual a análise da geometria do mundo não pode responder e que consiste em saber se existem fronteiras fechadas para o Universo, ou se ele constitui um espaço aberto. A resposta não pode ser encontrada em observações locais, pois ela envolve propriedades globais do espaço-tempo. Ou, para ser mais preciso, as observações que cabe fazer para nos encaminharmos na direção de uma resposta devem conter características do Universo que independem da distribuição local da matéria e energia nele contidas. As equações da relatividade geral não nos podem ensinar quase nada sobre essa característica global.

É preciso sair do território controlado pela geometria e penetrar os domínios do que os matemáticos chamam de topologia. Foi precisamente graças à independência das equações da gravitação com relação às características topológicas do Universo que Einstein pôde postular para seu modelo cosmológico uma topologia que lhe fosse conveniente, isto é, coerente com suas ideias apriorísticas sobre o comportamento global do Universo. Como era de esperar, dentro da visão herdada do século anterior, Einstein considerava "natural" sua escolha de que o Universo não tem fronteiras, mas deve ser finito e ilimitado. Ele postulou, então, que a topologia do mundo é fechada, semelhante à de uma esfera tridimensional. Curiosamente, 90 anos depois, não somos ainda capazes de saber se Einstein tinha razão, pouco sabemos sobre a estrutura topológica do Universo.

Origem da curvatura do mundo

A fonte responsável por essa geometria é o conjunto total das galáxias identificado com um gás incoerente, isto é, sem interação de caráter não gravitacional entre suas partes. Nessa representação da matéria constituinte do Universo como um fluido perfeito, cada partícula do fluido idealizado é associada a uma galáxia. Ademais, além dessa matéria observável, a origem do campo gravitacional que deforma a estrutura métrica do espaço-tempo

depende de uma força universal de repulsão caracterizada por uma constante cosmológica, a qual foi simbolizada pela letra grega Λ .

A história da constante cosmológica é fascinante e certamente merece detalhes mais específicos — a que nos dedicaremos posteriormente. Por ora, cabe um pequeno *intermezzo* para comentar algumas definições e ideias que físicos e cosmólogos têm sustentado e que, embora pretendendo levar a uma descrição completa de sua função, nada mais são que a caracterização limitada do campo de estudo da cosmologia. Creio ser importante que enumeremos essas definições para prosseguir na análise da questão que nos colocamos aqui para entender o que é isso que chamamos de cosmologia.

¹ Em qualquer teoria não linear do eletromagnetismo, a velocidade de propagação das ondas não é uma constante, como no caso linear de Maxwell. Tudo se passa como se essas ondas se propagassem em uma geometria efetiva, isto é, o fóton não linear viaja em outra geometria (cf. Novello *et al.* op.cit.).

² Em meu livro *Máquina do tempo: um olhar científico*, estendi-me longamente sobre a questão. Aqui e no capítulo relativo ao universo de Gödel, farei uma muito breve síntese do que está ali descrito.

³ De forma semelhante, o Universo eterno e dinâmico que foi introduzido 70 anos depois parece guardar uma íntima relação com a visão alternativa de movimento contínuo sugerida por Heráclito. Ver, por exemplo, "The program of an eternal universe", V Escola Brasileira de Cosmologia e Gravitação, 1987, World Scientific, disponível em www.icra.cbpf.br.

3. Algumas definições

Depois dessa breve introdução à questão cosmológica, assim como Einstein a estabeleceu, retomaremos a análise sobre o que é essa ciência que chamamos de cosmologia, com um grande salto em sua história a partir daquele primeiro movimento, em 1917, para saber como é entendida nos dias de hoje. Para isso é preciso examinar certas definições que encontramos em alguns livros que tratam da matéria. Embora essa talvez não seja a melhor prática para aprender o que é cosmologia, serve pelo menos para compreender como os cientistas a descrevem.

Como o território da cosmologia é disputado por várias comunidades — envolvendo astronomia, física de campos, física de altas energias, física da gravitação e outras —, cada uma delas produz uma escolha especial que depende de sua área de atuação e da ênfase que atribui a um particular aspecto dessa ciência. Assim, torna-se tarefa difícil precisá-la por meio de uma só definição — exceto se ela for abrangente o bastante, suficientemente genérica. Mas, desta forma, muito provavelmente ela estaria no limiar de perder seu poder de aplicação, posto que a escolha já contém o método, a prática que o cientista deve utilizar para que seja reconhecido como cosmólogo. Curiosa situação e que, longe de ser contraditória, longe de não permitir uma descrição unificada, indica uma situação especial para isso que chamamos de cosmologia e que devemos desvendar.

Queremos entender como é possível essas distintas definições conviverem entre si, como é possível essa falta de unanimidade precisamente na caracterização do objetivo principal de uma área da ciência tão relevante. É bem verdade que há pontos em comum entre elas, e, ademais, admitem alguns poucos princípios básicos que determinam a existência de práticas dotadas de formas que devem ser entendidas como

geradoras de caracterizações complementares. No entanto, para meu propósito, para empreender nossa caminhada nesta análise, para reconhecer o que chamamos de cosmologia e expressar uma versão dessa ciência que pareça mais que simplesmente aceitável, é preciso separar e examinar do ponto de vista crítico alguns desses conceitos comuns. É precisamente aí que iremos entender a origem de sua unidade, aquilo que sustenta e dá sentido às diferentes versões, uma vez que os princípios comuns se organizaram em referência à resposta inicial de Einstein quanto à questão: a física esgota a cosmologia?

Vamos iniciar o caminho examinando alguns exemplos típicos das definições recolhidas ao acaso, em livros que encontramos na biblioteca de qualquer instituto de física. A intervenção do físico polonês Andrzej Trautman está contida explicitamente nas notas de seu curso realizado no Brandeis Institute in Theoretical Physics, em 1964. Diz ele: "A cosmologia trata da estrutura e evolução do Universo considerado como uma totalidade, e as diferentes tentativas para dar uma descrição de sua geometria e correspondente distribuição de matéria."¹ Uma definição muito próxima daquela aceita por John A. Peacock, que afirma: "Para o relativista, cosmologia é a tarefa de procurar soluções das equações de campo de Einstein consistentes com a distribuição da matéria em larga escala."²

Como entender essas afirmações? Contrariamente ao que poderíamos ser levados a acreditar em um primeiro momento, Peacock não dá verdadeiramente uma definição que se pudesse considerar completa, utilizável em qualquer circunstância e por qualquer um. Não, ele não consegue fazer isso. Começa por invocar uma condição especial, uma situação particular cuja possibilidade de aceitação unânime poderia ser posta em dúvida. Limita-se a definir como uma classe particular de cientistas, aqueles que se identificam como *relativistas*, percebem a cosmologia. Isso poderia ser considerado uma boa atitude, posto que se organiza a partir da caracterização da principal força responsável pela estrutura do Universo, a gravitação. Mas para que a definição seja eficiente, para que possa ser usada em diferentes momentos, em qualquer ocasião, precisamos saber quem é esse relativista que vai assim definir a cosmologia. E por que ele a considera uma função, uma tarefa específica e limitada.

Apresentando-se como *relativista*, somos levados a imaginar que ele pretende colocar-se do lado da relatividade geral de Einstein. Mas de qual Einstein? Do primeiro Einstein, para quem a relatividade ainda não se aplicara ao Universo, ou para o Einstein cosmólogo, que produziu uma revolução dentro da revolução provocada por sua teoria — modificando sua primeira forma de descrição da gravitação e pretendendo exercer essa função ao produzir, e ser o primeiro a fazê-lo, uma cosmologia — uma estrutura global articulada entre a geometria e o conteúdo global de matéria do Universo?

Mas a questão maior para Einstein consistia em uma decisão preliminar, anterior a qualquer análise cosmológica, e que estava relacionada a saber se a cosmologia deveria ou não ser identificada com a física. Esse é o problema que deve anteceder qualquer discurso cosmológico. A definição de Peacock, por não exhibir a tensão da questão primeira da cosmologia, não nos ensina muito. Resta aquém da questão cosmológica de Einstein. De modo semelhante a Trautmann, Peacock pretende impor uma limitação à tarefa dessa ciência, que seria restrita, menor, reduzida a uma função quase automática, uma simples questão técnica, sem possibilidade de propor ou excitar novidades, a não ser aquelas contidas na geometria procurada. Sua tarefa se limitaria a conceber uma geometria que se adaptaria — através das equações da gravitação — à distribuição de matéria que os astrônomos observariam no Universo.

Já o cientista indiano K. Raychaudhuri afirma: "Cosmologia é a ciência do cosmo — da ordem que existe no Universo em larga escala."³ Ele identifica o cosmo com a ordem existente no Universo. Assim fazendo, tenta resgatar as origens da palavra grega *kosmos*, opondo-a a *kaos*. Mas isso requer uma predisposição a rejeitar o caos como elemento de estudo da cosmologia. Esta última só deveria examinar a fase ordenada do Universo. Uma eventual fase caótica é assim desqualificada *a priori*. Consequentemente, ela ignora ser possível à cosmologia o exame dos modos e processos graças aos quais um cosmo ordenado teria sido alcançado a partir de um estágio não ordenado.

Ao ter eliminada de seu estudo a eventual passagem caos/cosmo, a cosmologia se empobrece, perdendo seus momentos mais dramáticos, ao longo dos quais poderia existir uma transição de uma dessas fases para a

outra, e essa eventual passagem deixa de ser motivo de exame e estudo. Um Universo simples e estruturado seria assim produzido por uma escolha apriorística, eliminando a possibilidade de exame posterior dentro dessa ciência, de momentos que somente outros saberes poderiam ousar admitir. A possibilidade de associar o atual modelo padrão como uma etapa ulterior de um processo (eventualmente caótico) que teria ocorrido preliminarmente é descartada *a priori*. Ao descrevermos mais adiante esse modelo padrão, veremos como tal escolha limita a descrição da história do Universo.

Finalmente, como quarto exemplo do exercício comparativo que fazemos, consideremos a definição de P.J.E. Peebles, mais aceitável para a maioria da comunidade científica, afirmando:

A cosmologia física é a tentativa de dar sentido à natureza de larga escala do mundo material que nos rodeia, utilizando os métodos das ciências naturais...

Na física, encontramos a tradição mais antiga e honrosa, que busca entender de onde o mundo vem, para onde vai e por quê. A cosmologia herda essa tradição, em parte por desígnio, e em grande parte porque é para aí que a astronomia e a física a conduziram.⁴

A cosmologia teria a função de produzir um sentido, um significado para as imensas estruturas que observamos. Depois da tarefa preliminar, mas indispensável, de catalogação das informações que os astrônomos podem oferecer, seria preciso restringir cuidadosamente qualquer análise ulterior dos limites naturais que a ciência, em particular a física, impõe. A proposta de definição de Peebles é bastante esclarecedora e constitui uma grande ajuda para que se possa entender o status que a cosmologia adquiriu nos últimos anos.

De imediato, ela nos leva a perguntar: por que ele qualifica a cosmologia como *cosmologia física*? Por que é necessário adicionar o predicado *físico* a essa ciência? Qual a função dessa qualificação?

Uma leitura do texto de Peebles permite entender que as perguntas possuem uma só resposta: ela serve para enfatizar que a cosmologia deveria estar subordinada *de facto* à física. Ela seria somente um capítulo da física. E essa tarefa, essa função, teria sido dada ao cosmólogo tanto pelo astrônomo quanto pelo físico. O cosmólogo, então, seria um articulador — de um tipo semelhante ao de Peacock —, com a sutil diferença de que não

se limitaria às equações de Einstein, não precisaria restringir-se a examinar a geometria do Universo, independente de ser ou não um *relativista*. Ademais, fica claro que se trata de uma espécie particular de cosmologia: a cosmologia física. Isso parece levar o leitor sub-repticiamente a aceitar que somente essa existiria (e, nesse caso, o qualificativo "físico" seria redundante), ou que Peebles pretende separá-la de uma outra função — que ele sequer classifica, e dela já quer se afastar, rejeitando-a como matéria de exame.

A redução pretendida por Peebles é simplista, mas, ao ser admitida e incorporada por vários cientistas, adquire uma função política bem clara: ela pretende atrair todos os cientistas, bem como a rede institucional que lhes está associada, isto é, o *establishment* científico, para a nova ciência. E isso efetivamente ocorreu. O sucesso notável e o impacto na sociedade gerado pelo crescimento da cosmologia nas últimas décadas certamente utilizaram para seu desenvolvimento o apoio da comunidade dos físicos. Mas, por outro lado, ele também é responsável pela tentativa de impedir um olhar de profundidade que temos o direito de esperar da cosmologia, por meio da rejeição, muitas vezes implícita, do *aggiornamento* de sua questão primeira, de saber se essa ciência é algo mais que a física.

Finalmente, cabe um comentário sobre outra classe de definição que introduz um conceito novo, inexistente nas outras que examinamos até agora. Trata-se do mundo quântico. Teremos oportunidade de falar um pouco mais a respeito da influência do quântico sobre as características do Universo. Para o que nos interessa por agora, é conveniente citar somente uma dessas visões. Um exemplo típico é encontrado na definição que sintetiza a função da cosmologia da seguinte forma: *a cosmologia é o estudo do vazio e de como ele deixou de sê-lo*.

O Universo adquire, nessa definição, uma conotação nova, passando a depender do mundo quântico. Mas de que estrutura quântica falamos? Somente aquela associada à matéria, ou devemos associá-la ao próprio campo gravitacional? Há aqui dois caminhos a seguir, e ambos têm sido efetivamente percorridos. Por um lado, tem-se examinado a versão quântica restrita à matéria, deixando de lado o campo gravitacional, a geometria do mundo, como se ele tivesse uma natureza clássica, isto é, não quântica. Esse caminho constitui o que se chama uma descrição semiclássica. A segunda

vertente se embrenharia na difícil, complexa e ainda não totalmente bem-sucedida quantização completa, envolvendo a descrição quântica da matéria e da gravitação.

Até aqui tratamos do conceito convencional, clássico, de Universo, uma estrutura única e grandiosa. Com a definição que envolve o estado que chamamos de vazio e o mundo quântico, penetramos um outro território, mais complexo, onde até mesmo conceitos bem estabelecidos e que fazem parte de toda descrição racional da física — como, por exemplo, o espaço-tempo — deveriam ser reexaminados e tratados possivelmente como conceitos não fundamentais, mas derivados. Com um exemplo de cenário cosmológico, tendo o vazio como ponto de partida de sua descrição, veremos que essa definição aponta para outra visão da cosmologia. Por isso, em vez de procurar desqualificá-la, irei deixá-la para uma análise ulterior, quando for necessário procurarmos o caminho que vai da virtualidade à realidade. Isso será tema de nosso exame de algumas consequências dos vazios, clássico e quântico, e do papel de atrator que este estado especial — o vazio — desempenha.

Cosmologia física

Todas as definições que enumeramos acima propõem uma forma específica e particular de conceber a função do cosmólogo. Em verdade, cada uma delas indica o que o cosmólogo deve fazer para que seja caracterizado como tal, para que sua atividade seja reconhecida como tal. Todas elas contêm um pouco do que é o cosmólogo, mas não esgotam sua definição. Seu papel aí é secundário. Por que parece tão difícil encontrar entre os cosmólogos uma definição que ultrapasse essas dificuldades? O que estaria impedindo ou inibindo a explicitação de uma definição que não limitasse a cosmologia?

Parece que se procura evitar, com essas definições, todas as implicações contidas na aceitação de que a cosmologia trata de uma totalidade, o Universo, entendido como tudo-que-existe. E, ao lidar com totalidades, esbarra-se com a dificuldade de sua contextualização. Há alguns anos já aponteí quais são essas dificuldades e como se manifestam na produção de uma cosmologia racional.⁵ Aqui poderíamos apenas associá-las com a inibição dos cientistas de atacar frontalmente a questão principal com que Einstein iniciou a cosmologia moderna, isto é, em responder à pergunta: a física esgota a cosmologia?

Antes de nos lançarmos no caminho de produzir uma definição alternativa que pareça mais consistente e adaptada a todos os movimentos práticos e teóricos, bem como às intenções da cosmologia, a partir de um aprofundamento das críticas às propostas anteriores, devemos nos perguntar: por que essas definições não nos satisfazem? O que as torna limitadas? De imediato, em um primeiro momento de reflexão, aparece uma razão: todas elas reduzem o papel da cosmologia a uma simples "aplicação da física a grandes porções de espaço e de tempo". Mas a cosmologia, como irei argumentar neste ensaio, é mais: ela consiste na refundação da física.

Vimos anteriormente a caracterização daquilo que se chamou de cosmologia física. Isso nos leva de imediato a uma outra questão que lhe está associada, a saber, qual seria essa outra cosmologia que não merece sequer ser nomeada? O que teria ela de tão especial e singular, tão diferente, tão afastada da *cosmologia física* que não merece nem mesmo uma crítica?

O que teria essa cosmologia para ser, a um só tempo, não física e irrelevante, como parece afirmar Peebles?

Meu propósito aqui é desvendar, para entendê-la, essa função escondida. Antecipando, podemos dizer que se trata precisamente da famosa questão com que Einstein abre o livro da cosmologia do século XX, a saber, a cosmologia se esgota na física? Einstein não soube responder a essa pergunta, mas a considera de importância crucial para o empreendimento maior da ciência que procura uma descrição completa do Universo. Com o passar dos tempos, reconhecemos que houve uma diferença grande de atitude. O que para Einstein era visto como uma indagação tornou-se, nas décadas finais do século XX, uma certeza, embora com o reconhecimento geral de que o problema não fora resolvido.

A resposta de Peebles é uma tentativa de fixar o território da ciência deixando de fora as questões limítrofes, que envolvem seus fundamentos, para um tempo futuro. Em verdade, a proposta de redução da cosmologia à física deve ser entendida como uma atitude política, isto é, de embate produzido no interior da comunidade científica. Na visão positivista, só há duas alternativas excludentes para situá-la. Ou a cosmologia é ciência — e, nesse caso, deveria ser *cosmologia física* ou ela é metafísica.

Entre todos os problemas que a cosmologia se propõe examinar, contudo, alguns não possuem significado no interior do corpo formal da física, ou melhor, não podem sequer ser ali formulados. Entre eles está aquele que muitos cientistas argumentam ser seu objetivo maior: a origem do Universo. Teria o Universo um começo, separado de nós por um tempo finito, ou seria ele eterno? Nessa visão, a cosmologia ultrapassa os limites da física porque teria como objetivo a descrição da origem da matéria, da energia e até mesmo do espaço-tempo. E, afinal, ela permite colocar a questão mais fundamental entre todas: por que existe alguma coisa em vez de nada?

Essa pergunta tem sido tradicionalmente examinada, em todas as civilizações, por um discurso não científico, de natureza filosófica, mítica ou religiosa. A possibilidade de trazê-la para o interior da ciência, por um lado, e, por outro, a incapacidade, por um longo período, de se desvencilhar de um forte caráter especulativo que marcou o começo da cosmologia moderna por várias décadas criaram as condições necessárias para a dominação do conceito limitador contido na ideia de "cosmologia física" —

e a correspondente tentativa de redução do papel dessa ciência a nada mais que "... uma física aplicada a uma grande quantidade de matéria e de energia, envolvendo grandes quantidades de espaço e tempo". Em verdade, o sucesso, entre os físicos, dessa forma de definição foi responsável por impedir — e durante muito tempo — o reconhecimento da verdadeira função da cosmologia, ofuscando assim o papel mais importante que ela pode desempenhar, o de refundação da física.

¹ Andrzej Trautman, "Lectures on General Relativity", 1964.

² Jonh A. Peacock, *Cosmological Physics*, Cambridge University Press, 1999.

³ K. Raychaudhuri, *Theoretical Cosmology*, 1979.

⁴ P.J.E. Peebles, *Principles of Phisycal Cosmology*, 1993.

⁵ Mário Novello, *Cosmos et contexte*, op.cit.

4. A fundação da física

Fundação regional

A física moderna se organizou, a partir de Galileu, como a ciência da natureza, matematizável e geral, isto é, envolvendo a totalidade dos fenômenos observados. Como toda ciência, foi construída pouco a pouco, regionalmente, cada compartimento, cada parte, cada setor com sua particular origem e sua particular fundação. Na prática dessa atividade, sem que houvesse uma orquestração entre suas diferentes partes, ela foi construída por setores mais ou menos independentes, cada qual com uma função limitada, mas completa em seu domínio de aplicação. Essas diferentes partes da física, consideradas em sua união, testemunham a abrangência e amplidão de conhecimentos que adquirimos sobre a natureza.

Reconhecemos as partes por seus exemplos simbólicos, como mecânica, ótica, termodinâmica, eletricidade, magnetismo e outras, separadas por seus respectivos territórios de ação, pelas especificidades de cada um, bem como pelos agentes participantes em sua descrição. Cada um desses setores se estrutura, se organiza a partir do que chamamos de *fundação regional*, isto é, uma construção empreendida ao longo do tempo e que constitui uma tábua de princípios fundamentais e de estruturas básicas cuja função consiste em ordenar todo discurso possível de ser articulado naquele setor, um verdadeiro código de leis básicas e seus corolários imediatos, bem como das estruturas com que se descreve a totalidade das experiências que lhe são associadas.

É sobre cada uma dessas fundações que o correspondente setor da física se forma, estabelece, produz afirmações significantes, se organiza, formula uma hierarquia experimental e teórica, interpreta seus conhecimentos e lhes dá sentido. No começo, nos primórdios de cada uma das diferentes partes

dessa ciência, as correspondentes fundações foram realizadas, em maior ou menor dose, de modo arbitrário, certamente ainda incompleto, e podendo conter estruturas redundantes. Entretanto, a situação não é entendida assim, como incompleta, posto que não se requer dela mais que uma provisória orquestração que permita os primeiros passos, as primeiras expressões de princípios e axiomas aptos a dar sentido às afirmações resultantes da aplicação de suas leis correspondentes.

A elaboração das fundações regionais segue mais ou menos um padrão comum de evolução. Em um primeiro momento de síntese, produz-se um catálogo de observações e experimentos. Algumas leis provisórias e de aplicação limitada são construídas, e as condições de sua aplicação e o domínio de validade são estabelecidos. Para dar ordem e produzir uma unidade de descrição das leis, estabelece-se, mesmo que provisoriamente, o que deve ser entendido como seus fundamentos: a seleção de alguns conceitos postulados arbitrariamente como elementares e uma hierarquia, para que, a partir deles, de um modo formal e rigoroso, todos os demais se ordenem.

Fundação da ótica

Para uma descrição dos fenômenos ópticos, por exemplo, nos apoiamos sobre algumas definições e propriedades. Define-se o que é um "caminho ótico" — que estabelece o que deve ser entendido como a trajetória de um raio luminoso — e uma quantidade de caráter funcional, chamada de "índice de refração", que especifica as propriedades do meio por onde a luz se propaga. Com esses conceitos produzem-se afirmativas, estabelece-se um discurso científico associado e elaboram-se sentenças tais como, por exemplo:

- o caminho ótico para ir de um ponto A a outro ponto B do espaço é determinado pelo tempo mínimo entre todas as trajetórias possíveis.
- ao passar de um meio ótico, caracterizado por índice de refração $n(i)$, para um outro, de índice de refração $n(f)$, o desvio do raio

luminoso é dado por uma fórmula bem estabelecida que depende de $n(i)$ e $n(f)$.

E assim, sucessivamente, monta-se uma sequência de leis e processos consequentes que descrevem a totalidade dos fenômenos que lhes estão associados.

Fundação da termodinâmica

Na termodinâmica, a organização formal é da mesma natureza. Em um primeiro momento, trata-se de acumular dados, observações, processos envolvendo efeitos de transporte de calor entre corpos e as consequências no equilíbrio que resulta desse transporte. Examinam-se termômetros, instrumentos criados com propriedades ideais, conhecidos experimentalmente e que permitem realizar medidas. Leis são criadas, e se produz uma fundamentação elementar sobre esses modos de estabelecer relações entre temperatura e calor dos corpos.

Fundação da mecânica

O objeto de que trata a mecânica envolve corpos materiais ideais e reais, as forças a que são submetidos, seus movimentos. Em um primeiro momento, o conceito de inércia dos corpos serviu como ponto fundamental a partir do qual se estruturou a mecânica chamada clássica, leis de movimento, processos especiais de estabilidade, condições de simetria, invariâncias de descrição para observadores especiais.

Diversas formulações foram feitas, com o mesmo ingrediente observacional, mas diferentes descrições formais. Seu sucesso ao longo dos séculos XVIII e XIX foi tão notável que, em alguns lugares — como nas universidades francesas —, ela constituía, até muito recentemente, um departamento à parte, sem subordinação institucional à física ou à matemática. Sua refundação, na primeira década do século XX, se atribui a uma batalha perdida entre suas predições e as provenientes dos comentários

estruturados sobre as forças eletromagnéticas, gerando o que ficou conhecido como teoria da relatividade especial.

Poderíamos continuar enumerando casos particulares das diferentes partes da física. Creio, no entanto, que esses poucos exemplos são suficientes para entender como foram estruturadas e o nascimento de suas fundações provisórias.

Necessidade de refundação regional

À medida que uma dada ciência regional se desenvolve, a classe de experiências aumenta, e seus conhecimentos se ampliam, caminhando-se rumo a uma redução do número de hipóteses básicas e axiomas fundamentais para gerar suas leis a partir de uma quantidade mínima de princípios, apoiados em um nível mais fundamental. A necessidade de reexaminar criticamente os fundamentos começa então a aparecer e vai crescendo até o momento que se transforma em uma verdadeira obrigação formal.

A física regional requer, e mais, exige, essa refundação. Isso ocorre com todas as diferentes partes da física, embora esses momentos de evolução sejam locais, isto é, regionais, dependentes de cada setor e com tempos próprios de evolução formal, função do estágio de conhecimento de cada setor. Assim, vai-se processando, em tempos próprios e distintos, a refundação das diferentes partes da física. No caso da ótica, encontramos na teoria da propagação dos campos eletromagnéticos o instrumento formal necessário para gerar um nível de descrição mais fundamental. As equações que descrevem o eletromagnetismo possibilitam atingir esse nível, constituem a base necessária para fundamentar a ótica em bases mais profundas e abrangentes. Na termodinâmica, a refundação vem com a física estatística, que relaciona fenômenos termodinâmicos com propriedades da matéria, envolvendo um grande número de átomos. Sucessivamente, um a um, cada setor organiza sua refundação regional.

Realizada essa tarefa elementar, mas indispensável, da refundação das diferentes partes, surge a pergunta maior: e a física toda ela, sobre quais fundamentos está baseada? Isso conduz inevitavelmente à necessidade de

estabelecer o reexame dos fundamentos da física. É certo que, assim como seus diferentes setores, ela também possuía uma fundamentação provisória, ingênua, primitiva, e que consistia na condição básica para o fundamento de cada um de seus setores e na coerência de uns setores com relação aos outros. Seu caráter regional se estabelecia em relação a outras ciências, como a química, por exemplo. Entretanto, histórica e epistemologicamente, a necessidade de refundação da física não se identifica com a de suas partes.

Em um primeiro momento, pode-se pensar que a refundação da física nada mais seria que a refundação das diferentes seções. Isso exigiria que as partes fossem independentes, sem interseção, que a física fosse uma simples adição linear de setores independentes sem interações entre setores. Mas o interior de cada um deles só é independente dos outros por uma artificial simplificação metodológica. Podem-se, por exemplo, eliminar questões termodinâmicas no exame da propagação da luz para certo tipo de interesse provisório e casual do cientista, mas nada além disso. As interseções são mais explícitas à medida que cresce o grau de abrangência de um dado processo, de um dado fenômeno. Assim, o reconhecimento de que a física como um todo requer uma refundação que não se identifica com a refundação de suas partes foi objetivado.

Refundação global

Onde poderíamos encontrar os instrumentos formais necessários para empreender uma refundação tão completa? Como a física deveria operar para atingir esse objetivo? Como enumerar as tarefas, os procedimentos necessários para tanto? E como reconhecê-la? Sobre que bases epistemológicas deveria ser empreendida a conquista da refundação?

Foi Einstein quem, no começo do século XX, indicou uma solução possível, instituindo a cosmologia e concedendo-lhe como tarefa a refundação da física. À nova ciência competiria examinar criticamente a união de todas as ontologias regionais, na produção de uma ontologia global dessa ciência. Essa é a função da cosmologia, e é a partir dela que se devem definir sua prática e seu modo de operar. De modo implícito, tal era o processo com que Einstein pretendia elaborar uma cosmologia. Entretanto, a primeira abertura para sua entrada em cena foi relegada a um plano secundário não apenas por aqueles que se envolveram na tarefa prática de exercer tecnicamente essa ciência, mas pelo próprio Einstein. De maneira curiosa, ele também identificou ideologicamente seu modelo a seu Programa Cosmológico, restringindo assim a função da cosmologia. Não é meu propósito aqui historiar esse processo. O leitor interessado pode consultar a discussão que se estabeleceu ao longo dos anos seguintes ao aparecimento do primeiro estudo de Einstein sobre a questão cosmológica até o final da primeira metade do século XX.

Tratemos das considerações gerais para entender o que se perde ao aceitar a função que alguns físicos tentaram impor à cosmologia, procurando reduzi-la a nada mais que uma "física extragalática". Pois é esta nossa questão: o que se perde com essa restrição? Já conhecemos os argumentos favoráveis ao que se ganha. Em primeiro lugar, ganha-se reconhecimento, isto é, a atividade formal passa a ser tratada convencionalmente, como qualquer outra ciência. A necessidade de reconhecimento científico por parte dos cosmólogos escondeu a maior novidade da disciplina, seu caráter singular, que a distingue das demais ciências e que diz respeito à sua propriedade mais importante: o caráter de

refundação, de verdadeira *crítica da razão física*. Porque não podemos perder de vista a questão que consiste em saber sobre que bases a física está fundada. Ou, para ser mais prático e incisivo: qual o estado fundamental do Universo? Qual a origem das estruturas regionais que cada parte da física exhibe? Onde devemos procurar essa unidade formal e de sustentação prática do conteúdo material do mundo senão em sua globalidade — logo, na cosmologia? Mas, se é assim, então somos levados a afirmar e a entender que a função da cosmologia está associada à refundação da física.

Três períodos da cosmologia moderna

Podemos reconhecer três períodos distintos da cosmologia moderna. O primeiro vai de 1917, passando pela constatação da expansão do Universo (1929), até a descoberta da existência de uma radiação térmica de fundo, feita pelos norte-americanos Arno Penzias e Robert Wilson (1964). Começa aí uma segunda fase, com a aceitação, pela grande maioria dos cientistas, de que vivemos em um Universo que está em expansão. Pode-se dizer que esse período estende-se até o início dos anos 1980. A partir dessa década, entramos na terceira fase, que perdura até os tempos atuais. A primeira fase foi caracterizada pelo alto grau especulativo e a pouca atenção que a cosmologia recebia dos cientistas em geral, em particular dos físicos. Com a segunda fase iniciou-se a implantação do que se chamou, ulteriormente, de início da fase da cosmologia física, com a aceitação universal do cenário do big-bang, identificando-se o início da atual fase expansionista do Universo com o seu "começo".

Por que devemos voltar a examinar o Programa Cosmológico de Einstein se sabemos hoje que seu modelo não representa o mundo em que vivemos?

Responder a essa pergunta é o principal propósito deste livro. Devemos separar o Programa Cosmológico de Einstein de seu modelo (uma realização de pouco sucesso do programa). Para isso, primeiro, é preciso entender o que significa um modelo cosmológico e sobre que bases ele repousa, que são o território comum de praticamente todos os modelos cosmológicos. Não somente isso; cabe também entender que, ao estabelecer a questão cosmológica, Einstein produziu um movimento de ideias que o arrastou para fora da física, quando declarou que, para elaborar uma cosmologia, se faz necessário aceitar a existência de novas forças de natureza global, exclusivas da totalidade.

Essa questão aponta para a importante função da cosmologia, que tem sido minimizada. Para esclarecer qual é essa função, devemos comparar o

papel pioneiro de Einstein com o papel desempenhado pela crítica kantiana e sua caracterização como refundação da metafísica. Entretanto, também não podemos perder de vista as dessemelhanças, nem esquecer que a metodologia de Einstein, ao empreender a refundação da física, se distingue (além das características específicas de cada uma dessas áreas do conhecimento) bastante da de Kant. Einstein não executa seu papel à moda de Kant, que faz da crítica dos fundamentos de sua especificidade, a metafísica, seu tema de trabalho. Não. Einstein trabalha no interior da física, e, como tal, sua crítica aos fundamentos dessa ciência, que se realizou ao empreender seu Programa Cosmológico, não é percebida desse modo. Isso se deve ao fato de que, à época, a coerência global da física não estava em questão, e a tentativa de Einstein não foi entendida como parte da busca de uma formulação completa, exibindo uma coerência global.

Mas esta é precisamente a tarefa da refundação, exhibir com clareza o agente da atividade. Onde poderíamos encontrar aquela parte da física que teria essa função? A cosmologia, ao refundar a física, tentando mostrar sua coerência completa e uma explicação para os fundamentos de cada etapa regional, esgota nesse ato sua tarefa, ou produz algo novo, como pretendia Einstein? Devemos, uma vez mais, propor a questão: a cosmologia se esgota na física? Ou devemos nos encaminhar para entender como ela produz, organiza, estabelece os fundamentos dessa ciência?

No começo do século XXI, graças ao chamado *paradoxo da energia escura*, alguns cosmólogos revisitaram a atitude primeira de Einstein ao propor a introdução de novas formas de comportamento da matéria a que não temos acesso em laboratório terrestre. Isso reforça e atualiza a tese de que o Einstein de "Considerações cosmológicas sobre a teoria da relatividade"¹ defendia e construía a elaboração inicial do seu programa, que pode ser resumida numa sentença: *A cosmologia não se identifica com a física*.

É possível entender a afirmação de outra forma e dizer que a física depende da cosmologia, ou melhor, a coerência daquela se estabelece nesta, em seu desenvolvimento formal e na constituição de uma arena em que as ontologias regionais da física ganham significado e interação, isto é, entender por que podemos instituir a definição: *a cosmologia refunda a física*.

Para entender essa sentença e sua abrangência, devemos examinar, nesta caminhada, os concorrentes. Isso significa, em especial, repensar a questão: *por que a unificação da física não é uma refundação global?*

Decidimos proceder por analogia com o aparecimento das ontologias com que Heidegger apresenta a crítica kantiana, isto é, como um processo de refundação da metafísica. É desse modo que decidimos analisar a nova fundação da física. Assim como não se deve identificar a refundação da metafísica com sua estruturação lógica, não se pode confundir a organização de um formalismo lógico na elaboração de uma ciência com sua refundação. Para situá-la em sua verdadeira perspectiva no interior da evolução da ciência, é necessária uma muito breve passagem por alguns importantes momentos que, ao longo do século XX, estão associados ao programa unificador.

Unificação, conteúdo e forma: refundação regional

As propriedades elétricas e magnéticas são conhecidas de longa data. Assim como a gravitação, esses dois tipos de processos estiveram ao alcance de nossa observação na pré-história da ciência, quando não estávamos ainda interessados neles, quando não pensávamos ser possível provocar e controlar seus surgimentos. Eles apareciam naturalmente, isto é, não era preciso, para produzi-los, usar qualquer parafernália disponível somente nos laboratórios. É por isso que os reconhecemos como fundamentais, pois estão ao alcance de nossos sentidos, em nossa prática cotidiana.

Entretanto, a unificação dos processos elétricos com os processos magnéticos — entendidos desde longa data como próximos, mas não idênticos —, gerando uma só estrutura, as forças eletromagnéticas, é de história recente, de pouco mais de um século. Quando se deu esse passo, quando se obteve a unificação do que se denominava "mundo elétrico" com o "mundo magnético", realizou-se uma refundação local. As bases de cada uma dessas partes da física foram refeitas, unificadas e reestruturadas sobre conceitos mais profundos e sólidos. Sua abrangência apareceu de imediato como um grande sucesso de natureza prática.

Contudo, por mais importante que tenha sido essa unificação, quer sob o aspecto formal, quer em suas consequências experimentais, práticas e utilitárias, tratava-se de nada mais que isto, uma refundação local. Em verdade, de forma equivalente, não é difícil compreender que toda unificação é uma refundação regional.

Quando, na segunda década do século XX, se descobriu ser possível associar uma forma de descrição geométrica a processos gravitacionais, de imediato alguns cientistas deram início ao exame da possibilidade de estender essa geometrização. Tal procedimento não possuía nenhum suporte observacional. Ademais, mesmo a razão principal e maior segundo a qual se iniciou o procedimento de geometrização da gravitação estava ausente. Só para lembrar, duas são as bases que levaram os cientistas a aceitar aquela geometrização. Por um lado, a universalidade da interação gravitacional, que permitia substituir a "força gravitacional newtoniana" por uma ação

única exercida sobre o meio em que os corpos se movimentam, o espaço-tempo comum. Por outro lado, viabilizava-se a quantificação da possível identificação geométrica, a observação de que, para qualquer corpo material, a razão entre a massa inercial e sua correspondente massa gravitacional é uma constante única, universal. Lembremos que essas duas quantidades possuem origens consideradas distintas: a massa inercial é o agente que requer a presença de força externa para retirar qualquer corpo de seu estado de repouso ou movimento retilíneo e uniforme; a massa gravitacional é o agente pelo qual passam e intervêm o efeito e a ação gravitacional.

Independentemente da ausência de maior motivação, vários cientistas passaram boa parte de suas vidas, ao longo do século XX, voltados, sem sucesso, para a unificação geométrica. Einstein foi certamente o exemplo mais notável. Dedicou os últimos 30 anos de vida à busca dessa unificação. O que o teria levado a isso?

Creio que podemos simplificar a resposta numa só ideia: a tentativa de procurar bases comuns, mais profundas e conseqüentemente mais sólidas, para edificar a física, isto é, refundar essa ciência. Parece curioso que o principal articulador da versão moderna da cosmologia não tenha identificado essa função, a prática dessa ciência, como uma refundação, e tenha sido levado a ver a função em uma possível formulação matemática unitária, hierárquica, logicamente estruturada.

O avanço das teorias quânticas de campo na virada da segunda metade do século XX permitiu sucessos notáveis, dos quais merecem particular menção, por seu papel na sustentação dessa ideologia, as chamadas teorias de gauge, que produziram uma forma matematicamente sofisticada, mas dentro do mesmo pensamento unificador dos antigos cenários, adquirindo enorme popularidade.²

Por que a cosmologia é a refundação da física?

Refundar uma ciência é reestruturar seus fundamentos. É refazer as bases sobre as quais aquela ciência está construída, reexaminar seu arcabouço e conceder-lhe um modo de se organizar sobre um dado solo. Trata-se não somente de reerguer seu edifício formal sobre novas bases, mas de fincar mais fundo as estacas sobre a base de sustentação, dar-lhe uma nova estruturação que esteja tão solidamente fundamentada que lhe permita resistir a investidas cada vez mais violentas das críticas que lhe possam ser feitas, bem como das intempéries de caráter formal. É descer à raiz do conhecimento, produzir uma ontologia que a preserve de assaltos teóricos baseados ou não em novas observações.

No caso da física, a produção que a cosmologia pode oferecer é facilmente reconhecida: trata-se de procurar esquemas globais, estruturas formais capazes de levar à produção de um discurso coerente e formalmente aberto, envolvendo a totalidade dos objetos com que essa ciência lida. Dar a essa configuração o nome de *Universo* permite assegurar-lhe *ab initio* um status especial. Mas, ao mesmo tempo, remete a uma tradição específica, incluindo questões limítrofes que irão constituir, e para sempre, um exemplo de atividade não convencional com qual as ciências da natureza em geral não ousam se envolver, justamente sob pena de ser tratadas de maneira discriminatória, como atividade singular e limítrofe.

Que questões poderíamos analisar, na cosmologia, que permitissem refundar a física, o que, sem elas, não seria possível? Para entender de um modo mais simples em que consiste, na prática, essa refundação, vamos examinar dois exemplos que permitem explicitar essa função. É bem verdade que corremos um grande risco ao fazer essa simplificação: o risco de que a refundação seja identificada a esses exemplos, e somente a eles; que, ao se identificar com os exemplos, ela perca sua condição singular de crítica, de refundação, e que seja vista apenas como exercício formal. Vale a pena correr o risco, pois teremos ocasião de mostrar, ou pelo menos de apontar, em que direção e para onde a cosmologia vai — o que certamente a faz maior que esses exemplos particulares.

Refundar a física, enfim, é procurar dar significado a questões como, por exemplo: por que existe mais matéria que antimatéria no Universo? Qual o estado fundamental do Universo? O que significa, dentro de uma dada teoria, a existência de um estado fundamental? Onde poderíamos encontrar solo suficientemente amplo e sólido para sustentar a estrutura completa da física?

Deveríamos procurar um lugar que permitisse articular conceitos, como *estado fundamental*, que possuísse a abrangência dos antigos absolutos da física em seus primórdios — como o absoluto *espaço* —, sem arcar com o pesado ônus de seus defeitos, entre os quais o imobilismo conceitual.

Para dar uma ideia de onde devemos procurar as respostas a essas questões, vamos dar dois exemplos esclarecedores. São eles: o estado fundamental da matéria e a estrutura global do espaço-tempo.

Ou, unificando em uma só questão: qual o estado fundamental do espaço-tempo? Fora do contexto cosmológico, ao longo do século XX, a resposta dada foi uma só: trata-se da estrutura da geometria de Minkowski. Mas essa resposta só tem validade local. É boa para experiências efetuadas em laboratório terrestre. Para responder globalmente à questão, devemos antes responder à pergunta: qual a boa teoria da gravitação?

¹ Título do artigo de 1917, publicado pela Academia de Ciências da Prússia.

² O exame dessas teorias nos afastaria muito de nossa questão principal. Este breve comentário é para alertar o leitor de que tais formas de unificação, mesmo quando se apresentam, arrogantemente e com marcada ideologia pós-moderna, como "teoria-de-tudo", não nos interessam aqui, por se tratar de uma atividade de refundação regional. Para ser mais preciso e rigoroso, o procedimento matemático de unificar pode, com efeito, constituir uma refundação global, mas só na medida em que produza uma nova cosmologia.

5. O estado fundamental

As estruturas de caráter apriorístico que dominaram a representação do mundo elaborada pelos físicos desde o início da ciência moderna, a partir do século XVI, sustentavam o discurso da física pré-relativista no que se chamou posteriormente de "espaço absoluto" e "tempo absoluto". Elas cederam sua posição ao único absoluto que a relatividade especial produziu: a estrutura métrica do espaço-tempo unificado de Minkowski. A introdução, nesse cenário, da nova descrição da força gravitacional universal pelas análises feitas na relatividade geral (RG) produziu uma nova revolução, reestruturando a geometria e fazendo-a depender do conteúdo energético e material existente no mundo. As equações da RG produziram uma classe infinita de configurações associadas à distribuição material e, graças à sua não linearidade, de configurações inesperadas, geradas pela própria autointeração gravitacional. Entretanto — fato notável, mas nada surpreendente —, seu estado fundamental, aquela configuração básica que conteria o mais simétrico dos mundos geométricos, não foi alterado: continuou a ser pensado como a configuração do espaço-tempo de Minkowski.

O reconhecimento de que a geometria de Minkowski seria o limite natural da estrutura geométrica do mundo, na ausência idealizada de qualquer efeito gravitacional, levou ao reconhecimento de que até mesmo uma teoria geométrica — como a relatividade geral — poderia ser formalmente descrita como se fosse um campo em autointeração propagando-se e interagindo no substrato absoluto e permanente, o espaço-tempo da relatividade especial. A geometria com a qual se poderia identificar esse campo seria nada mais que um modo eficiente e formalmente compacto de descrever a profunda e complexa não linearidade do campo gravitacional ao se propagar no substrato de Minkowski. Assim,

a relatividade especial fornece as estruturas formais sobre as quais se fundamentaria toda a física. Talvez não haja lugar mais evidente desse embasamento que a própria descrição moderna das partículas elementares e sua versão quântica, a chamada teoria quântica dos campos. Segundo esse modo de tratar os componentes, as substâncias elementares que constituem o estofo com que os corpos materiais são construídos, cada partícula, possuem uma correspondente descrição individualizada como um campo, uma forma matemática associada a diferentes representações da estrutura fundamental da geometria de Minkowski, caracterizada pelo grupo de suas simetrias chamado grupo de Lorentz, isto é, o conjunto de transformações de coordenadas que deixam invariante a métrica de Minkowski.

As diferentes formas de matéria e a simetria fundamental do espaço-tempo

Para dar um exemplo concreto, capaz de sustentar a argumentação de que a função da cosmologia é produzir a refundação da física, vamos examinar a evolução do modo pelo qual os físicos têm caracterizado as propriedades das partículas elementares. A ausência de um verdadeiro pensamento global na física pré-relativista alçara ao status de verdade científica alguns frágeis argumentos intuitivos, herdados do senso comum. Como exemplo disso, podemos lembrar que as quantidades elementares, os corpos microscópicos, não deveriam ter suas propriedades dependentes de propriedades extrínsecas, de características do espaço-tempo, sejam elas associadas a processos locais ou globais, mas tão somente das especificidades que as singularizam e, eventualmente, de processos que ocorrem em suas vizinhanças.

Assim, por exemplo, quando, no começo e ao longo do século XX, foram-se identificando partículas elementares em diversos fenômenos — como os elétrons, prótons, nêutrons, fótons etc. —, parecia se impor a ideia de que seria possível descrevê-los de modo independente de processos globais, de ações não contíguas ocorrendo no Universo. Afinal, argumentava-se, a descrição dessas quantidades elementares, de dimensões extremamente reduzidas, quase puntiformes, não deveria depender do que ocorre além de um certo domínio espacial. A ideia de que o Universo deveria ser um sistema autoconsistente, e, por conseguinte, que as estruturas locais e globais deveriam interpenetrar-se na formação dessas propriedades, não era então dominante. Mesmo uma versão suave e simplista das formulações atribuídas a Ernst Mach — de que algumas propriedades locais da matéria devem depender da estrutura global do Universo —, embora não totalmente rejeitada, não fazia parte do núcleo duro, central, do pensamento científico vigente. Uma primeira mudança de atitude ocorreu com o advento da relatividade especial. À medida que essa teoria foi sendo absorvida e aceita pelos físicos, a argumentação sobre a possível relação entre as

propriedades das partículas elementares e a estrutura do espaço-tempo começou a ganhar força.¹

Para entendermos essa relação, devemos primeiramente exemplificar o modo pelo qual os constituintes da matéria, isto é, as chamadas partículas elementares, são descritos. Faremos uma síntese breve e não exaustiva dessas propriedades, enfatizando aspectos diretamente relacionados à nossa questão aqui, que é, lembremos, examinar a dependência das propriedades íntimas da matéria² com a estrutura global do espaço-tempo.

Hádrons e léptons, mésons, fótons e grávitons³

Ao longo do século XX, os físicos conseguiram isolar um grande número de partículas — ditas elementares — com as quais toda substância material e suas interações são descritas. A lista de tais partículas é hoje enorme, e elas podem ser classificadas de vários modos. Em nossa simplificada passagem por essa descrição iremos separá-las em duas grandes classes que chamaremos de "fontes" e "agentes intermediários das forças", ou simplesmente "agentes intermediários".

As partículas intermediárias são aquelas que carregam a informação da interação. Trata-se dos fótons (os intermediários das interações eletromagnéticas), dos grávitons (intermediários das interações gravitacionais), dos mésons vetoriais (intermediários das interações fracas) e os píons (intermediários das interações fortes). Isso não exaure todos os processos, mas é suficiente para entendermos simplificadaamente as interações.

As "fontes" são as partículas que geram processos de interação, como prótons e nêutrons (chamados hádrons), para a interação forte; elétrons e neutrinos (os léptons), para a interação fraca; prótons e elétrons, para a interação eletromagnética; e qualquer uma dessas para a interação gravitacional.

Existe outro modo de agrupar essas partículas segundo uma propriedade chamada spin, representada pela letra s . As partículas fontes (prótons, elétrons, nêutrons) têm spin semi-inteiro ($1/2$), e as partículas intermediadoras têm spin inteiro — zero para o pión, um para o fóton e os mésons vetoriais, e dois para o gráviton. Além dessa quantidade intrínseca (o spin), cada uma delas possui um valor característico que constitui sua massa. No caso das interações de longo alcance, como o eletromagnetismo e a gravitação, supõe-se que as partículas intermediárias (fótons e grávitons) possuam massa zero.⁴

Um modo de classificação conduziria à designação para cada partícula material dos dois números que correspondem a seu spin e sua massa.

Assim, o próton seria designado como a partícula de spin $1/2$ e massa $M_p = 1,67 \times 10^{-24}$ gramas; o elétron, como a partícula de spin $1/2$ e massa $M_e = 9,1 \times 10^{-28}$ gramas. De forma talvez inesperada, essa caracterização está intimamente associada, de um modo direto e único, à estrutura geométrica do espaço-tempo, na teoria da relatividade especial. Como isso é possível? Como se foi levado a sustentar a afirmação de que a caracterização das propriedades mais íntimas das partículas elementares estão relacionadas à estrutura métrica do mundo?

Observadores inerciais e o grupo de Poincaré

Para entendermos como é possível dizer que a caracterização das partículas elementares relaciona-se à estrutura geométrica do espaço-tempo, devemos reconhecer a transformação pela qual passou, ao longo dos séculos, o modo de descrição de acontecimentos no mundo. Para distinguir claramente, em um dado fenômeno, o que é "objetivo" do que deve ser considerado "subjetivo", foi-se levado a elaborar regras de comparação para serem aplicadas às diferentes experimentações, de tal modo que se pudesse separar o que deve ser entendido como uma propriedade *verdadeira* de um dado acontecimento no mundo daquilo que nada mais é que uma deformação produzida por um particular modo de observação.

Assim, por exemplo, diferentes observadores, em estados distintos de movimento, são capazes de efetuar medidas, associadas a eventos classificados como *reais*, que dependem não somente das propriedades do próprio evento, mas também das particularidades do estado relativo de movimento ou repouso do próprio observador. Para proceder a um método sistemático e universalmente aplicável, em qualquer circunstância, de modo objetivo — eliminando-se a dependência de afirmações sobre os acontecimentos das eventuais especificidades cinemáticas do observador que as mede —, introduziu-se a ideia de *quantidades invariantes*. De um modo simples, podemos dizer que essas quantidades determinam aquilo que é comum a todas as medidas, com a função de eliminar subjetividades, isto é, características associadas não somente à coisa observada, mas àquele que a observa, às particularidades de seu estado de movimento. Alternativamente, elas permitem o acesso à caracterização dos eventos de tal modo que as propriedades particulares do estado cinemático do observador podem ser separadas das condições fortuitas, de conteúdo formal independente e que são comuns a toda medida. Essa técnica de separação deveria permitir isolar o que é intrínseco, específico ao acontecimento, daquelas outras informações eventuais, não determinantes, envolvendo propriedades particulares associadas àquele que as mede.

Não cabe aqui entrar nos detalhes técnicos dessa operação, mas tão somente notar que a matemática que rege as transformações das medidas efetuadas por diferentes observadores em situações cinemáticas não equivalentes permite empreender com eficácia essa atividade. Foi graças a tal operação que se instituiu com sucesso a teoria da relatividade especial (TRE). Entretanto, é importante lembrar aqui que a TRE substituiu os absolutos (espaço e tempo) newtonianos por uma estrutura absoluta unificada (o espaço-tempo de Poincaré-Einstein), privilegiando uma classe de observadores: os inerciais, isto é, aqueles que estão em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme uns em relação aos outros.

A representação simbólica capaz de produzir, a partir dessa classe, uma estrutura matemática unificada para o espaço-tempo foi feita pelo matemático alemão K. Minkowski. De um modo simples, podemos dizer que a estrutura chamada de variedade ou geometria de Minkowski constitui um espaço-tempo de quatro dimensões sem curvatura, plano. Nessa variedade, chamamos de T as transformações de medidas entre a classe infinita de observadores inerciais (com diferentes velocidades, por exemplo) caracterizadas por uma lei que faz associar a cada quatro números (X_0, X_1, X_2, X_3) ⁵ outro conjunto (Z_0, Z_1, Z_2, Z_3) . Assim, T , a operação que passa de X_a a Z_a , nada mais é que a comparação das medidas de um mesmo ponto no espaço-tempo realizada por observadores inerciais em estados de movimentos distintos.

O conjunto infinito de todas essas transformações T constitui uma estrutura matemática precisa chamada *grupo*. Isso requer que, entre todas as transformações possíveis, exista a identidade (denotada por 1) e, para cada transformação T , exista uma inversa, representada por T^{-1} , de tal modo que a aplicação sucessiva de ambas as transformações conduza à identidade, isto é, à operação seguida dessas transformações, que denotaremos pela relação $T \cdot T^{-1} = 1$. Esse grupo de transformações, denominado grupo de Poincaré, ou grupo de Lorentz não homogêneo, nada mais é que a totalidade das aplicações de todo o espaço-tempo plano de Minkowski em si mesmo. Então, a totalidade das distintas descrições do mundo que podem ser feitas por observadores inerciais é caracterizada pelo grupo de Poincaré.

Uma vez estabelecida a natureza matemática das transformações que relacionam diferentes medidas efetuadas pelos observadores inerciais no

mundo, uma vez reconhecida e identificada essa estrutura com a forma matemática de um grupo, devemos perguntar aos matemáticos o que podem eles nos dizer sobre as propriedades formais do grupo. A resposta tem vários ingredientes, mas, para o que nos interessa aqui, vamos nos concentrar nos invariantes de Casimir.

O que são esses invariantes? São quantidades típicas de cada grupo, possuindo um espectro de valores permitidos bem definido, que servem para classificar as diferentes representações, isto é, os diferentes modos de representá-lo. No caso particular do grupo de Poincaré, existem precisamente dois e somente dois desses valores especiais de Casimir, que receberam os nomes de massa (M) e spin (S). Assim, embutidas na caracterização das propriedades matemáticas associadas à lei de transformação de distintos observadores inerciais no espaço-tempo unificado de Minkowski (isto é, o que chamamos espaço tridimensional e tempo unidimensional), reconhecemos quantidades elementares capazes de classificar cada partícula que existe. Dito de outro modo, como toda partícula elementar que existe no mundo é descrita no espaço-tempo de Minkowski, o exame detalhado das propriedades de troca de informação entre observadores inerciais permite classificar as partículas existentes a partir da análise das propriedades dos invariantes associados ao grupo de transformações desse espaço-tempo de Minkowski, isto é, o grupo de Poincaré.

As origens geométricas das simetrias

A estrutura geométrica de Minkowski constitui um conjunto de pontos gerando um espaço-tempo quadridimensional plano, isento de curvaturas, dotado de uma métrica especial capaz de singularizar os caminhos da luz. Essa particularidade do caminho da luz — chamado cone de luz — pode ser entendido de modo simples pela comparação entre a noção de distância entre dois pontos no espaço convencional euclidiano e no espaço-tempo de Minkowski. A propriedade mais notável reside no fato de que, em um espaço euclidiano, se a distância entre dois pontos A e B , denotada por $d(A,B)$, é zero, isso significa que os dois pontos são idênticos, isto é, $d(A,B) = 0$ implica $A = B$. No espaço-tempo minkowskiano, essa propriedade não persiste: é possível que a distância entre dois pontos M e N seja nula sem que os dois pontos sejam o mesmo. Essa propriedade separa o mundo em três setores, conforme a distância de um ponto O (tomado arbitrariamente como a origem de nossa representação dos pontos do espaço-tempo de Minkowski) — como mostra a Figura 1.

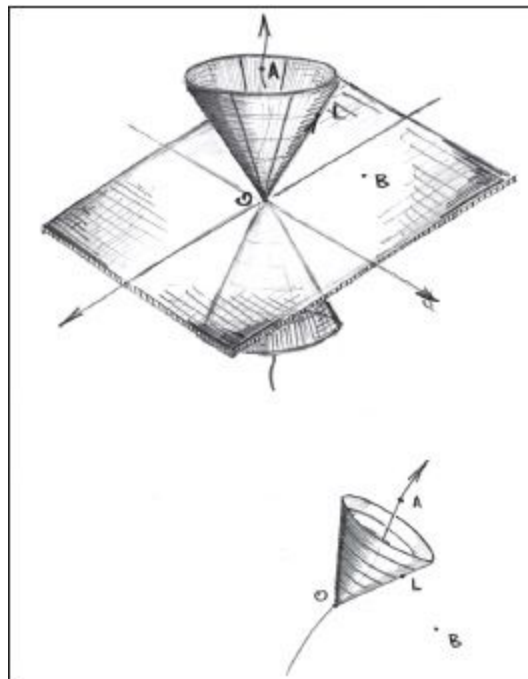


Figura 1

Diagramas que ilustram a partição em três regiões distintas do espaço-tempo de Minkowski. O cone de luz separa dois desses domínios. Mais embaixo, o mesmo cone de luz visto de outro ângulo.

Por outro lado, a distância minkowskiana de O a A , isto é, $d(OA)$ é positiva; a distância $d(O, L)$ é nula, e a distância $d(O, B)$ é negativa. Os pontos, como L , que estão ligados a O por caminhos de distância nula constituem o "cone de luz". Eles representam as trajetórias possíveis da luz a partir do ponto O . Esse cone nulo ou cone de luz⁶ separa o mundo entre quantidades observáveis com possibilidade de interação com um corpo material em O (os pontos no interior do cone), e os de fora, sem possibilidade de contato causal.

Os comprimentos, em geral, não são preservados ao ser medidos por observadores arbitrários. Mas se as transformações entre os observadores forem especiais, restritas ao grupo de Poincaré — isto é, se trocarmos um observador inercial por outro observador inercial —, então elas serão invariantes. Dito de outro modo, sabemos que réguas e relógios são estruturas materiais que podem depender do estado de movimento dos observadores. As transformações de coordenadas que deixam invariante essa métrica, no espaço-tempo de Minkowski, consistem precisamente no grupo de Poincaré. De um conjunto que deixa invariante uma dada métrica, dizemos que ele constitui as transformações isométricas. O número de tais transformações invariantes depende da estrutura do espaço que lhe serve de sustentação. Os matemáticos mostraram que, em um espaço-tempo de quatro dimensões — como o nosso —, o número máximo de isometrias permitido, coerente com as regras e fundamentações desse conceito, é dez. Esse é, assim, o número de simetrias do espaço-tempo de Minkowski. Podemos redefinir aquele espaço-tempo simplesmente afirmando que ele possui o número máximo de simetrias permitido em uma estrutura quadridimensional.

A descrição de propriedades íntimas da matéria está relacionada às simetrias do espaço-tempo. Mas não a toda simetria de qualquer tipo de espaço-tempo, e sim precisamente àquela que, introduzida na TRE, constitui o estado fundamental da TRG. Isto é, de todos os tipos de geometria que constituem possíveis configurações que satisfazem as

equações que descrevem o campo gravitacional, o mais fundamental, o que possui o maior número admissível de simetrias, é a geometria de Minkowski, de curvatura nula. Surge então a questão: é somente nessa geometria especial que podemos estabelecer uma relação entre as simetrias do espaço-tempo e as propriedades (como massa e spin) das partículas elementares? Antes de respondermos à pergunta, devemos fazer um breve desvio para comentar o papel dos observadores inerciais e outros na representação dos processos na natureza, dos fenômenos no mundo.

Observadores acelerados

A descrição do mundo por meio de observadores inerciais aparece como estrutura comum, única e simples. Isto é, passar da descrição dos fenômenos feita por um observador inercial para outro não afeta as expressões das fórmulas que representam as leis da física, nem a totalidade dos processos que ela descreve. A correspondente descrição feita por outros observadores introduz novas propriedades, algumas inusitadas, embora igualmente válidas e também capazes de produzir uma história verdadeira sobre o mundo.

No entanto, é preciso enfatizar que essas diferentes versões da realidade — feitas ou por um observador inercial ou por um observador acelerado — podem ter aparências bem distintas. Para dar um exemplo de como uma representação do mundo depende das características daquele que o descreve, anticipo aqui uma propriedade que, à primeira vista, é chocante e emerge da descrição da realidade feita por uma classe de observadores não inerciais: a classe de observadores com aceleração constante.

Consideremos, por exemplo, uma caixa que, para um observador inercial, está vazia, contendo zero partícula de uma dada espécie, qualquer uma. Se perguntarmos a um observador que está movido por uma aceleração constante (durante toda a sua descrição) quantas partículas dessa mesma espécie estão presentes na mesma caixa, ele dirá, por suas medidas, que ela contém um certo número de partículas diferente de zero. Tal propriedade leva, obrigatoriamente, a que se reveja o conceito atribuído à ideia de partícula.⁷

O exemplo serve apenas para excitar a imaginação do leitor e fazê-lo compreender que a universalidade da descrição dos fenômenos no mundo depende das perguntas que fazemos ao mundo, cujas respostas são obtidas por meio de medidas e observações, bem como das propriedades daquele que observa, como seu estado de movimento.

O grupo de simetrias do espaço-tempo de deSitter

Se o espaço-tempo de Minkowski pode ser entendido como o verdadeiro estado fundamental da física na ausência das forças gravitacionais, sua permanência nessa condição depende da equação que descreve a evolução do campo gravitacional.

Vimos que o espaço-tempo de Minkowski, de um ponto de vista técnico, pode ser associado a uma estrutura plana, sem curvatura alguma. Além disso, ele possui o número máximo de simetrias que uma geometria de quatro dimensões pode conter, isto é, dez. Essas simetrias podem ser separadas em quatro translações espaço-temporais e mais seis quantidades relacionadas a transformações de um observador inercial para outro observador inercial. Façamos agora a pergunta: existe alguma outra geometria de quatro dimensões que, assim como o espaço-tempo de Minkowski, tenha também esse número máximo de simetrias?

A resposta dada pelos matemáticos é sim. Mais interessante ainda, demonstrou-se que, além da geometria de Minkowski, existe somente uma outra geometria com essa propriedade. Ela foi descoberta pelo holandês Willen deSitter e é chamada de geometria ou Universo de deSitter. Como esse grupo de simetria possui o mesmo número de quantidades independente, não é de estranhar que também suas quantidades invariantes — o que chamamos acima de invariantes de Casimir — sejam duas. Embora elas sejam distintas das correspondentes invariantes do grupo de Poincaré, nós as chamaremos de massa e spin, por simplicidade e abuso de linguagem. Explico: a principal diferença entre as geometrias de Minkowski e de deSitter reside no fato de que, embora ambas tenham curvatura constante, o valor dessa curvatura é zero no caso de Minkowski e diferente de zero no caso de deSitter, quando a curvatura tem o valor da constante cosmológica denotada pela letra grega Λ , maiúscula.

Para que a nomenclatura que usamos, chamando de massa e spin os invariantes de Casimir, no caso do espaço-tempo curvo de deSitter, seja realmente significativa, deveríamos mostrar que, no limite imaginativo em que esta constante Λ for zero, todas as características relevantes do grupo

de deSitter devem resultar em nada mais que equivalentes representações do grupo de Poincaré. Ora, em alguns casos isso não ocorre. Antes de enfatizar a diferença, vamos deixar de lado as considerações técnicas, às quais teremos de voltar quando tratarmos das diversas interpretações de Λ que os físicos criaram, e pensar na noção de estado fundamental na presença do campo gravitacional.

Estado fundamental

Na física pré-relativista, o estado fundamental do espaço e do tempo consistia na estrutura absoluta, eterna e imutável utilizada como palco para os acontecimentos, os fenômenos físicos. A teoria da relatividade especial produziu uma estrutura mais complexa, o espaço-tempo, cujo estado básico consiste numa configuração geométrica de curvatura nula, a geometria de Minkowski. Essa configuração, que passou a ser usada como a arena dos processos físicos, substituiu, no imaginário dos cientistas, o absoluto newtoniano por uma outra forma de absoluto, alçando os sistemas de referências ligados a observadores inerciais à condição de espectadores privilegiados dos fenômenos descritos pela física.

Entretanto, essa passagem dos chamados sistemas galileanos absolutos, que a física newtoniana produzira, para os sistemas relativistas não permitiu a caracterização do estado fundamental do espaço-tempo de um modo realista. É fácil entender a razão: para aceitar a caracterização de que a geometria do mundo se identifica com a geometria de Minkowski, constrói-se uma enorme hipótese simplificadora de que o campo gravitacional pode ser deixado de lado. Isto é, aceita-se assim a hipótese de que a força gravitacional pode ser completamente ignorada na descrição desse estado. A simplificação é útil para a análise de alguns processos com que os físicos deparam no laboratório, mas certamente não representa a situação realista do mundo, por exemplo, em situações de campo gravitacional forte, como ocorre nas vizinhanças de um objeto colapsado, como um buraco negro, e em boa parte dos processos analisados em cosmologia.

Como devemos entender a afirmação de que a passagem das estruturas absolutas newtonianas — o espaço absoluto e o tempo absoluto — para a estrutura absoluta unificada — o espaço-tempo de Minkowski, introduzido na teoria da relatividade especial — só teria atingido sua plenitude formal com o aparecimento da teoria da relatividade geral? Por que é necessário fazer apelo à força gravitacional para entender essa evolução formal?

A razão para isso não é difícil de ser entendida. Ela está intimamente vinculada ao caráter universal da gravitação, e sua consequência maior liga-

se à possibilidade de associar essa força à geometria do espaço-tempo. Se pretendemos caracterizar o espaço-tempo, se queremos conhecer o estado fundamental do vazio da geometria, devemos procurar conhecer quais as propriedades que a gravitação permite que ele possua. Como caracterizar esse estado, para poder reconhecê-lo como fundamental?

Como a gravitação, afinal, nada mais é que uma força, ela deve preencher os critérios que toda interação, toda força, exhibe. A teoria geral dos processos de interação leva a caracterizar esse estado básico, fundamental, como aquele que possui menos irregularidades, isto é, o mais homogêneo. Nesse momento, não é mais suficiente nos apoiarmos na vaga ideia da universalidade da interação gravitacional. É preciso dar um passo à frente e ir além da genérica aceitação de sua universalidade: é necessário que entre em cena sua dinâmica específica, isto é, deve-se explicitar a equação que controla os processos gravitacionais, conhecer os detalhes desse envolvimento global gravitacional entre tudo-que-existe. Em suma, é preciso conhecer explicitamente sua evolução, as equações que permitem quantificar essa influência.

Campo gravitacional

Se usarmos um critério simplista, que adote como definição de fundamental o estado de um sistema que *atraia os demais estados*, estaremos certamente dentro da lógica convencional, usando o bom senso. Isso nos levaria a identificar o estado fundamental como aquele em que a energia do sistema seja mínima. Entretanto, teríamos de abrir exceções a tal caracterização para acomodar alguns casos em que isso não ocorre. Para evitar que entremos em discussões de caráter técnico — alertando o leitor para o fato de que há outros modos não equivalentes de definir o que se pode entender por *estado fundamental* —, aceitaremos provisoriamente a definição anterior. Ela possui, além de simplicidade, a vantagem de permitir, uma vez conhecida a dinâmica de um sistema, reconhecer de imediato e sem ambiguidades esse estado especial.

Assim, o estado fundamental de um sistema físico é conhecido por meio de uma análise de sua dinâmica e, dependendo das propriedades dessa dinâmica, pode ser único ou não. Uma condição necessária é que, nesse

estado, o sistema possua uma aparência homogênea, uniforme. O conceito de homogeneidade é usado aqui em sentido bem amplo. Quando se trata de um campo físico — como o que nos interessa — que constitui uma estrutura assumindo valores definidos em todos os pontos do espaço-tempo, o estado não deve exibir preferência por ponto algum do espaço-tempo. O campo deve apresentar as mesmas propriedades em todos os pontos. O caso mais simples é aquele em que o campo se reduz a uma constante, tem um mesmo valor em todos os lugares e em todos os tempos, e, por simplificação formal, lhe associamos o valor zero. Entretanto, nem sempre um modo tão simples de caracterização pode ser realizado. Nos dois casos que iremos examinar a seguir mostraremos que, em um deles, isso é possível, mas não no outro. Quais são os casos que nos interessam e o que precisamos examinar para estabelecer o estado fundamental do Universo? E por que se pode afirmar que eles são somente dois? De onde podemos concluir isso?

A cosmologia é capaz de responder a essas questões. Isso porque ela requer preliminarmente o exame e a decisão a respeito de qual teoria da gravitação devemos aplicar para empreender uma descrição completa do Universo. Estamos, uma vez mais, à frente da questão que Einstein colocou e que ainda hoje não sabemos responder de modo definitivo: qual a boa teoria da gravitação que devemos usar para explicar processos que ocorrem nos confins do Universo? As observações das últimas décadas deixaram sobreviver somente duas teorias da gravitação,⁸ ambas propostas por Einstein. Elas possuem "vazios", isto é, estados fundamentais distintos, cada qual correspondente a uma das duas teorias que chamarei de teoria da gravitação RG-1 e teoria da gravitação RG-2. Dessas considerações segue-se que devemos esperar que as duas teorias possuam estados fundamentais distintos. Uma análise um pouco mais detalhada mostra que assim ocorre, de fato. Vamos então examinar separadamente esses estados em cada uma das duas teorias.

Campo gravitacional na teoria RG-1. Aí a solução fundamental tem o número máximo de simetrias compatível com um espaço-tempo de quatro dimensões. O estado fundamental é a geometria de Minkowski, uma estrutura que coincide com a estrutura absoluta do espaço-tempo que a relatividade especial admite. Em verdade, as equações primeiras da

relatividade geral foram estabelecidas para que isso ocorresse, tendo essa condição como principal vínculo que uma teoria da gravitação deveria satisfazer.

Campo gravitacional na teoria RG-2. A teoria da relatividade geral, que estamos chamando de RG-2, apareceu como consequência da primeira tentativa da aplicação da teoria da gravitação à totalidade do mundo, ao Universo. Nela aparece uma força de caráter misterioso que atua em tudo que existe da mesma forma e que não é atuado por nada. Curiosamente, quando Einstein usou essa teoria modificada para procurar a geometria do Universo — o chamado modelo cosmológico de Einstein —, a solução que encontrou não foi a fundamental. Foi o holandês deSitter quem conseguiu obter, como solução das equações de RG-2, a geometria fundamental, aquela que possui o número máximo de simetrias possível. Para que o leitor possa acompanhar nossa caminhada, cabe fazer aqui uma pausa para entender as propriedades dessa geometria e conhecer um pouco melhor a misteriosa constante cosmológica que permitiu colocar uma alternativa à geometria fundamental do espaço-tempo.

Minkowski ou deSitter?

Para construir um modelo que relacione as diferentes propriedades da matéria à estrutura do espaço-tempo, devemos responder primeiramente à questão: qual é o estado fundamental da geometria do Universo, o de Minkowski ou o de deSitter? A pergunta aparece como um bom exemplo de que, ao pensarmos globalmente, ao relacionarmos as propriedades da matéria à natureza da geometria, passando para o nível da cosmologia, estamos nos aproximando do exercício formal de refundação da física. A análise do estudo e classificação das partículas elementares — e até mesmo suas diferentes espécies — passa pela questão do conhecimento do estado fundamental do Universo. Essa é uma das faces daquilo que devemos entender como constituindo a refundação da física.

Em resumo, podemos concluir que a cosmologia, ao se livrar dos impedimentos formais de lidar com o Universo como um sistema completo, levanta questões de ordem global que nenhuma parte da física está responsabilizada por tratar. Mais que isso, a ciência abdicara de lidar com essas questões pela aceitação implícita que elas estariam para sempre fora do controle observacional. Por exemplo, podemos examinar o significado e as propriedades que podem ser atribuídos à ideia de um estado único fundamental para o Universo. E, se esse conceito pode ser investigado, poderíamos igualmente tratar da cosmogonia, isto é, construir modelos descrevendo a criação da substância existente no Universo?

Para entendermos o alcance da refundação da física, para aceitarmos o papel maior da cosmologia, tal como a entendemos a partir de nossa releitura de Einstein, essa ciência deve exhibir, antes de qualquer outra função, a dependência cósmica do estado fundamental do espaço-tempo. Somente assim se legitima sua função. E isso se deve à impossibilidade que a física tem de chegar a essas questões analisando processos limitados no espaço e no tempo. De um ponto de vista histórico, a ideia de um *estado natural*, que dominava o pensamento das ciências da natureza, evoluiu para a de *estado fundamental* que seria o lugar de equilíbrio estável, pensado como o atrator natural para um sistema físico. É bem verdade que existem

exemplos em que essa estabilidade cede lugar à instabilidade. Um caso notável pode ser precisamente o nosso Universo.

¹ É importante sublinhar aqui o caráter global dessa estrutura. A geometria é a mesma em todos os pontos desse espaço-tempo homogêneo de Minkowski.

² Estamos nos referindo às características típicas, como a massa e o spin de cada partícula.

³ Os grávitons, contrariamente às demais partículas aqui citadas, ainda não foram observados.

⁴ Ver capítulo sobre a constante cosmológica, em que se explica a relação entre o alcance infinito da interação eletromagnética e a propriedade do fóton de ter massa nula.

⁵ Que chamaremos por simplificação gráfica de X_a (com $a = 0,1,2,3$).

⁶ A identificação do cone nulo com o cone de luz só pode ser feita graças à linearidade do eletromagnetismo. Nas teorias não lineares, a relação entre esses dois cones é mais complexa. Ver, por exemplo, Mário Novello *et al.*, *op.cit.*

⁷ Ver, por exemplo, Nami Fux Svaiter, 1989, e referências de trabalhos anteriores ali apresentadas.

⁸ Em verdade, há ainda espaço para outras, mas deixaremos essas teorias limítrofes e ainda bastante especulativas para serem examinadas em outra oportunidade.

6. O Grande Lambda

(ou as várias faces da constante cosmológica)

A introdução da constante cosmológica no arcabouço formal com que Einstein pretendia descrever o Universo não requer sua explicação em termos da física. Trata-se de uma propriedade típica da Totalidade, uma característica da estrutura global. Ele a introduziu como parte complementar da geometria, sem conexão com a matéria, mas também sem a identificar com a geometria. Em verdade, o Grande Lambda (Λ)¹ não se identifica com a matéria, nem tampouco está associado a qualquer forma de funcional geométrico ou da curvatura do espaço-tempo, nem é descrito como dependente dela.

É interessante fazer uma pausa para dar uma explicação um pouco técnica, mas que irá esclarecer a relação de Einstein com essa constante e nos permitir entender uma das interpretações recentes dessa constante. Ao examinar a questão cosmológica, Einstein se viu levado a alterar suas equações originais para adequar a teoria gravitacional a seu cenário mental do Universo. Essas equações consistiam, originalmente, em dois termos que são iguados, resultando na dinâmica necessária para descrever qualquer processo gravitacional. Do lado esquerdo da equação, ele escreveu somente termos relacionados e dependentes da geometria. Do lado direito, colocou a fonte do campo, ou melhor, a fonte da modificação da geometria em cada ponto do espaço-tempo, que identificou a toda forma de matéria e energia de caráter não gravitacional. Pois bem: onde colocou ele o novo termo? A alteração de suas equações originais foi feita pelo acréscimo de um termo de "matéria" ou de "geometria"?

É sintomático da ideologia que deu sustentação ao modelo de Einstein o fato de que o termo adicional tenha sido colocado do lado esquerdo, isto é, como se ele estivesse envolvido somente com a geometria do Universo, e

não com seu conteúdo material. O Grande Lambda não deve ser considerado "matéria" nem "geometria", mas Einstein preferiu colocá-lo mais próximo desta que daquela. E assim o fez.

Esse passo inicial, essa tentativa ousada e sem apoio em outra parte da ciência, deve ser entendida como a primeira estratégia para libertar a cosmologia da física. É esse passo que dá a esse movimento de ideias, por parte de Einstein, sua singularidade, a característica de ser único, desde o aparecimento da física moderna, com Galileu. Não existe nenhum esquema formal com característica tão inovadora desde o aparecimento da física moderna, nada semelhante entre as diferentes propostas de descrição da realidade em todos os seus níveis. Trata-se menos de uma propriedade especial da matéria, e mais a primeira ação de mostrar a novidade desse procedimento, inaugurando — de modo análogo ao que fez Kant na metafísica — a refundação da física. Ela anuncia o reconhecimento de que, ao tratar da totalidade do que existe, devemos estar preparados para aceitar propriedades e modos de existir que não possuam contrapartida em nossa vizinhança, que não se reduzem a um modo de articulação das propriedades da física com que descrevemos o mundo em nossa vizinhança. Einstein explicitou o tempo todo, em sua argumentação, que foi precisamente a introdução dessa quantidade que lhe permitiu elaborar de modo coerente o primeiro modelo cosmológico.

Entretanto, logo após o reconhecimento do "fracasso" do modelo cosmológico de Einstein — e da descoberta, por Friedmann, de que não é preciso introduzir propriedades esdrúxulas para descrever o Universo, de que, afinal, o Grande Lambda introduzido por Einstein não era necessário para criar um cenário cosmológico —, ele não foi imediatamente abandonado e continua a figurar entre as ferramentas formais que o cosmólogo usa para produzir um modelo do cosmo, uma cosmologia. Ele foi pensado como uma entidade cuja origem e significado deveriam ter uma explicação ulterior, associada a uma expectativa de que deveria ser possível reduzi-lo a esquemas convencionais, descrevendo-o em termos de quantidades físicas convencionais, bem conhecidas. Com efeito, o Grande Lambda teve, desde então, várias tentativas de explicação no interior da física. Para exemplificar a situação, vamos comentar algumas dessas interpretações que adquiriram popularidade junto à comunidade científica.

O Grande Lambda foi associado a vários mecanismos, alguns bem conhecidos, convencionais, clássicos, outros mais complexos. Iremos nos limitar aqui a examinar somente três diferentes sugestões para sua compreensão, propostas desde sua misteriosa função cósmica original até a recente interpretação envolvendo uma característica especial da partícula mediadora da interação gravitacional, o gráviton. São eles:

- interpretação clássica: Λ nada mais é que a representação formal de um fluido perfeito com uma estranha equação de estado relacionando sua densidade de energia com sua pressão;
- interpretação quântica: Λ representa a energia do vácuo de todos os campos quânticos;
- interpretação geométrica: Λ está associado à massa do gráviton.

Vejamos brevemente cada uma dessas interpretações.

Grande Lambda como um fluido perfeito?

O modo mais simples de representar o conteúdo material e energético do Universo consiste em identificá-lo a um fluido perfeito, isto é, uma estrutura contínua, caracterizada por duas quantidades dinâmicas — a densidade de energia e a correspondente pressão que representa a interação entre suas diferentes partes atuando umas sobre as outras — e, na cinemática, por sua velocidade. Trata-se, claro, de uma idealização graças à qual se simplifica enormemente a tarefa de atribuir ao Universo um conteúdo energético modelado por considerações simples. Desse modo, as estrelas que compõem as galáxias e, sucessivamente, as próprias galáxias, as concentrações maiores, as gigantescas distribuições de matéria — aglomerados de galáxias —, todas são representadas de modo simples, mas que permite um tratamento matemático completo e fácil de ser manipulado.

Na prática dessa descrição do conteúdo material do Universo, propõe-se uma relação adicional entre a densidade de energia e a pressão, imitando o comportamento de estruturas conhecidas como *fluido perfeito*, para tornar sua análise simples e matematicamente tratável. Isso é feito por uma equação de estado do fluido que permite reduzir aquelas duas variáveis a uma só, relacionando a pressão p e a densidade de energia ρ em uma expressão linear que, por tradição, se escreve com a letra grega minúscula lambda: $p = \lambda \rho$. Devemos notar que essas duas quantidades — pequeno lambda e Grande Lambda — são totalmente independentes e simbolizadas por uma mesma letra grega somente por questões históricas de convenção.

Por várias razões — uma delas a que envolve a propagação do som no fluido cósmico —, limita-se formalmente o valor da razão entre a densidade de energia e a pressão, de tal modo que $0 < \lambda < 1$. Essa razão é, em princípio, positiva e limitada, não pode ultrapassar o valor da unidade. O valor de λ pode ser arbitrário, dentro dos limites impostos pelas condições gerais já mencionadas. Além desse valor que a teoria dos fluidos admite, os físicos desenvolveram modelos teóricos alternativos, nos quais λ pode assumir valores negativos em certos casos especiais.

Surge, no entanto, uma questão: ao nos referirmos à equação de estado, estamos falando de uma lei geral? O pequeno λ , a razão entre a pressão e a densidade de energia, é uma constante universal, típica de cada fluido? Qualquer observador que examine tal característica do fluido medirá o mesmo valor? Ou, em outras palavras, a equação de estado, relacionando energia e pressão, é universal, a mesma para diferentes observadores? Uma análise um pouco mais sofisticada dessa relação mostra que não: diferentes observadores, em distintas condições cinemáticas, isto é, em estados de movimento diferentes, com velocidades diferentes, medem diferentes valores de pequeno λ . Isso significa que λ , para um dado fluido, não é uma constante universal, não é a mesma para todos os observadores.

Mas se, como acabamos de afirmar, genericamente, a equação de estado de um fluido depende do observador, isso significa que o valor de pequeno λ depende não somente do fluido, mas também do estado de movimento do observador em relação ao fluido. Assim surge a questão: haveria alguma situação privilegiada entre todos os possíveis fluidos que existem na natureza, haveria alguma equação de estado especial, algum valor singular, privilegiado, de λ , que tivesse a propriedade de ser universal, a mesma para qualquer observador?

Sem dúvida alguma todos estamos de acordo em reconhecer que, se houvesse esse valor, se, entre todos os fluidos possíveis de admitir esse tratamento, tal relação linear entre a densidade e a pressão, houvesse um (ou mais de um) com a propriedade de universalidade, então certamente esse fluido deveria ser considerado excepcional, pois poderia ser apontado por todos os observadores como possuidor da mesma equação de estado.

Para alegria dos cientistas que procuram relações universais, independentes dos observadores, esse valor de λ existe! E mais interessante ainda: ele é único. Há somente um valor de λ que o faz universal, medido igualmente por todo e qualquer observador, independentemente de seu próprio estado de movimento. E isso acontece quando o valor de λ é dado pela unidade negativa, isto é, quando $\lambda = -1$.

Então se coloca a questão: que fluido é esse? Por que, entre todos os fluidos existentes e que observamos em situações convencionais ou especiais, fabricadas em laboratórios, a natureza teria singularizado um só? Que características únicas teria esse fluido para que fosse tão especial? As

respostas a essas questões não são difíceis de se dar. Quando examinamos um pouco mais intimamente as propriedades do fluido, chegamos à curiosa constatação de que ele nada mais é que a distribuição de energia descrita pela constante cosmológica! Isto é, o caso especial $\lambda = -1$ pode ser precisamente associado à distribuição de energia identificada com a constante cosmológica.

Esse fluido, o mesmo para todos os observadores, tem assim um status altamente privilegiado. Ele é universal. De modo análogo ao que ocorre com a luz, cuja velocidade é a mesma para todos os observadores, independentemente de seus estados de movimento, também esse fluido que caracteriza Grande Lambda é especial. E como a luz possui um status singular na estruturação da geometria do mundo, também Grande Lambda, esse fluido universal terá um papel especial, singular, na estrutura da geometria do Universo.

Desse modo, à pergunta inicial — a constante cosmológica pode ser interpretada como um fluido cósmico perfeito? —, devemos responder com um inquestionável sim! Além disso, trata-se de um fluido perfeito muito especial, pois ele tem a mesma aparência para todos os observadores. Isso de imediato nos leva a lembrar, por analogia, a ideia do *éter*, uma substância muito especial que preencheria todo o Universo e que exibiria propriedades absolutas. Curiosamente, depois de usar a teoria da relatividade especial para tornar desnecessário o inobservável éter que povoava o imaginário dos físicos no final do século XIX, a teoria da gravitação de Einstein começa sua análise do Universo, sua cosmologia, aplicando a teoria da relatividade geral ao Universo e introduzindo uma quantidade — o Grande Lambda — que possui propriedades semelhantes (mas não idênticas!) às daquele éter que o próprio Einstein havia retirado do cenário científico!

Grande Lambda como energia do vácuo dos campos da física?

Algumas descobertas da ciência muitas vezes ocorrem ao mesmo tempo em vários centros de pesquisas, realizadas por diferentes cientistas em contextos que, em geral, são bem distintos uns dos outros. A história da ciência está cheia dessas *coincidências* — que muitas vezes estão longe de ser tão coincidentes assim. Algumas dessas descobertas são tão típicas do pensamento comum de uma dada época que chega a ser difícil saber onde o pensamento que lhe deu origem se iniciou, quem foi o primeiro a formulá-lo explicitamente na forma pela qual ele se consolidou, ou mesmo quantas pessoas chegaram ao mesmo resultado de modo simultâneo.

A descoberta de que o vazio quântico, um estado especial da matéria, pode imitar uma estrutura identificada com a constante cosmológica é uma delas. Diferentes pessoas associadas a diversos centros de pesquisa contam histórias semelhantes, como se fossem particularmente originais, afirmando peremptoriamente que este ou aquele cientista teria sido o primeiro a expor a nova teoria, a nova formulação.

Além dos campos de interação que representam as quatro forças existentes, os físicos associam, biunivocamente, um campo a cada partícula — seja ela material, como o elétron, ou diáfana, como o fóton. De tal modo, falar de uma partícula qualquer Ψ ou um campo Ψ é, na maior parte das vezes, um modo simples de formular um discurso sobre a mesma realidade física. Há vários modos de caracterizar esse estado, mas um dos mais intensamente utilizados envolve o conceito de estabilidade de um sistema físico.

Entre todos os possíveis estados de um sistema físico qualquer, existe um deles caracterizado por um valor mínimo — um estado de menor energia possível —, ao qual chamamos de *estado fundamental* do sistema em questão. A física quântica se estruturou de modo a poder construir todo e qualquer estado de todo e qualquer sistema físico a partir de ações representadas por operadores matemáticos atuando sobre esse estado fundamental. O estado de energia mínima, esse estado fundamental, típico de cada sistema físico é chamado de *estado de vácuo* ou *vazio*.

Por outro lado, a fonte do campo gravitacional pode ser qualquer forma de matéria e energia. Em verdade, essa fonte é descrita em termos de uma estrutura mais complexa, denominada tensor de energia-momento, que, além de caracterizar a energia, representa também uma série de outras quantidades (ao todo dez, para ser preciso) que descrevem de modo mais completo as propriedades de qualquer sistema na geração de um campo gravitacional. Pois bem, mostrou-se que a distribuição de energia e o momento correspondente ao estado de vácuo de diferentes campos físicos têm uma forma funcional indistinguível daquela que descreve a constante cosmológica. Em outras palavras, podemos dizer que não é possível distinguir a existência de uma constante cosmológica colocada *ad hoc* nas equações RG-1 (transformando sua equação para uma forma funcional idêntica à teoria que chamamos de RG-2) da presença de um campo físico em seu estado fundamental. Simplificadamente, podemos apresentar essas equações por dois esquemas alternativos.

Na teoria RG-1, a equação da gravitação se reduz à forma: *funcional da geometria = fonte material ou energia de radiação*.

Na teoria RG-2, a equação da gravitação se reduz à forma: *funcional da geometria + Λ = fonte material ou energia de radiação*.

Para sermos um pouco mais específicos, é possível afirmar que esses dois sistemas, embora possuindo interpretações distintas, são fisicamente equivalentes. Com efeito, façamos algumas comparações.

Sistema físico I. Um campo gravitacional satisfaz às equações RG-1 tendo como fonte qualquer forma de matéria e/ou radiação. No caso particular de a fonte se identificar ao vácuo de um campo, ela pode, de modo equivalente, ser caracterizada por uma constante que chamamos, convencionalmente, pelo nome de Grande Lambda, ou constante cosmológica. Por ser identificada à matéria, ela é escrita, simbolicamente, do lado direito da equação.

Sistema físico II. Um campo gravitacional satisfaz as equações RG-2 tendo como fonte qualquer forma de matéria e/ou radiação. Além dessa fonte,

existe uma constante adicional que aparece associada à métrica, chamada Grande Lambda ou constante cosmológica. Dessa forma, Λ aparece do lado esquerdo da equação.

Os sistemas físicos I e II são indistinguíveis. Nos últimos anos, a segunda interpretação a associação de Λ ao vácuo dos diferentes campos da física adquiriu status elevado junto a uma certa comunidade de cosmólogos, precisamente aquela cuja origem e cujo principal método de análise da questão cosmológica têm suas raízes na física das altas energias, ou física das partículas elementares. Alguns chegam mesmo a afirmar que a compreensão da constante cosmológica estaria intimamente associada à compreensão do vácuo, o estado fundamental dos campos de matéria. Talvez fosse conveniente um breve comentário sobre o sucesso dessa interpretação, pelo menos junto a essa comunidade.

Grande Lambda e o vácuo dos campos físicos

A física quântica produziu um enorme avanço no conhecimento da estrutura material do mundo. Não somente em seus aspectos técnicos, mas também alterando a imagem mental que tínhamos sobre a representação e organização da matéria em seus diferentes estados. Sabemos, por exemplo, que o campo eletromagnético possui uma versão quântica que o associa a grãos elementares de energia, os fótons. Esse procedimento formal, matemático, de entender a estrutura quântica se espalhou para toda a matéria. Na análise do processo, em sua prática formal, singularizou-se um estado fundamental chamado vácuo. Não se irá aqui detalhar o processo, mas somente chamar a atenção para uma propriedade desse estado que nos ajuda a entender a questão que envolve a interpretação de Λ .

Os primeiros físicos a compreender esse processo de quantização de um campo da física (o campo eletromagnético) depararam com um problema que lhes pareceu grave e era de difícil solução. Ao examinar a distribuição de energia do estado vácuo, observaram que seu valor não era zero, como poderíamos esperar, mas infinito! É fácil entender, assim, a dificuldade que tal situação provocou. Embora a análise da questão seja fascinante, aqui só precisamos compreender qual a primeira solução que os físicos produziram para sair do aparente paradoxo, isto é, o resultado formal obtido de que, para qual quer campo quantizado, o estado fundamental que por construção deveria ter energia mais baixa possui energia infinita!

As observações realizadas revelam aspectos quânticos somente como diferenças entre certos estados de equilíbrio que deixaram de ter essa condição por efeito de algum agente que o excitou. Tomemos como exemplo o caso de um átomo. Um elétron orbital, que se estende em torno de um núcleo central, pode ser excitado e conduzido a uma órbita mais energética. Ato seguinte, ele emitirá essa excitação, por exemplo, por meio da emissão de um fóton que possua energia igual à diferença de energia entre as duas órbitas estáveis que o elétron frequentou. Esse processo de emissão foi entendido, em um primeiro momento, como a explicação

natural para eliminar, ou melhor, reduzir o alcance e os efeitos daquela dificuldade.

De fato, uma vez que todos os processos na natureza parecem ser desse tipo, a dificuldade do valor absoluto e possivelmente infinito do estado fundamental desaparece, posto que ela não poderia ser observada. Só observamos, afirmava-se, diferenças de energia. Assim, se um estado tem energia $E(1)$, ele pode ser entendido como a soma da parte infinita da energia do estado de vácuo fundamental mais uma excitação, isto é, $E(1) = E(vac) + e$. Ele pode decair em um outro estado de energia $E(2) = E(vac) + v$. Somente a diferença de energia entre eles, dada por $\Delta E = E(2) - E(1) = v - e$, seria observável. Se o valor $E(vac)$ for realmente infinito, seu efeito desapareceria no processo de medida, seria simplesmente inobservável, e, como a física só trata de observáveis, a dificuldade estaria, se não resolvida de todo, pelo menos transcendida: poderíamos passar ao largo de suas desagradáveis consequências.

Embora todos reconhecessem a precariedade dessa explicação, seu caráter provisório poderia não produzir maiores dificuldades, graças ao sucesso teórico-experimental conseguido pelo processo de quantização dos campos materiais. Entretanto, a paz foi alterada de forma violenta com a entrada em cena do papel desempenhado pelo campo gravitacional em uma descrição completa do Universo. Podemos entender as razões disso ao reconhecer que o modo de pensar que estamos utilizando, e que foi usado para produzir a explicação acima, se resume a considerar processos realizáveis no laboratório, desde que possamos desprezar, pela fraqueza de sua intensidade, o campo gravitacional. Entretanto, de um ponto de vista estritamente formal, a eliminação de processos gravitacionais não poderia ser mantida, a não ser como uma aproximação do que de fato está ocorrendo.

Ao levar em conta a força gravitacional, a dificuldade do valor infinito de energia correspondendo ao estado de vácuo aparece em sua grandiosidade. Com efeito, pela teoria da relatividade geral, qualquer corpo material ou energético gera campo gravitacional. Por conseguinte, se o vácuo é uma realidade — e os físicos de partículas têm provas de sobra de que ele realmente o é —, então, qualquer que seja o valor de sua energia, finita ou não, ele produz um campo gravitacional. As consequências de um

argumento tão simples quanto esse, baseado somente na universalidade da força gravitacional e nas equações da relatividade geral, foi devastador.

Percebeu-se em seguida que a ideia engenhosa e eficiente de desconsiderar a dificuldade da energia-do-vácuo tinha sido um grande engano. Ou, para sermos menos ingênuos, a solução apresentada não resistiria a um simples comentário estudantil, desde que os físicos envolvidos nos estudos das propriedades elementares da matéria não ficassem tão fechados em seu microcosmo, desprezando em suas análises o importante papel desempenhado pela gravitação. Parece mesmo difícil imaginar que os cientistas tenham aceitado, em passado recente, uma explicação tão simplista.

Dentro desse novo cenário, introduzida novamente a ação gravitacional — que nenhum argumento fundamental poderia ter retirado —, a questão do vácuo reapareceu com mais força, até o momento em que ela pôde ser associada a um processo relacionado à cosmologia.

A história é verdadeiramente fascinante, pois a solução de associar o estado de vácuo à constante cosmológica criou de imediato um outro problema, que alguns cientistas acreditam ser mais sério que o anterior. Como podemos associar a qualquer forma de matéria um campo quantizado; e, como todo campo possui um vácuo fundamental, por que então o valor de Λ é tão pequeno como parece, a aceitarmos as informações obtidas pela observação do Universo? Como o leitor deve estar começando a compreender, parece que estamos falando de uma história sem fim, como o conto das mil e uma noites, e já é chegado o momento de entrarmos na terceira interpretação dessa constante.

Grande Lambda e a massa do gráviton

Vamos agora tratar da mais recente interpretação de Λ . Embora ela não tenha o mesmo status que as duas outras interpretações, resolvi incluí-la aqui — embora ainda esteja longe de ser mais que uma simples ideia em formação, uma proposta ainda em discussão — porque ela já possui uma história intensa e curiosa. Essa proposta, mesmo com uma aparência "natural", levou quase um século para ser explicitada. Como foi isso possível? Para entendermos essa questão, devemos fazer aqui um pequeno desvio sobre o modo quântico de interpretar as forças físicas, que é bastante distinto do senso comum. Como o foco de nossa atenção é a constante cosmológica, nós nos limitaremos a uma descrição bastante sucinta desse modo.²

Primeiro é preciso entender o significado que se dá à palavra gráviton, o que ela simboliza. De um modo direto e simples, pode-se definir o gráviton como o grão elementar de energia gravitacional, o quantum da gravitação.³ A definição foi herdada da semelhança dos dois campos de longo alcance conhecidos. Assim como o fóton se identifica com o quantum do campo eletromagnético, os físicos argumentaram que deveria existir um equivalente gravitacional, uma partícula mediadora dessa interação, e ela recebeu o nome de gráviton, embora, em aspectos fundamentais, a teoria da gravitação se afaste muito da descrição convencional de uma teoria de campo.⁴ Iremos seguir o caminho convencional que se estrutura a partir do paradigma — pelo menos em sua concepção original — gerado pela teoria do campo eletromagnético.

Teoria do alcance de Yukawa

A teoria quântica da luz mostrou que a interação eletromagnética pode ser descrita como a consequência da troca de fótons entre corpos carregados. Esses fótons têm uma característica especial: são partículas sem massa, sem carga, nada mais que energia e movimento carregando a informação da interação eletromagnética.

Usando esse campo como paradigma, a propriedade foi generalizada para outras interações, outras forças, que seriam, por sua vez, mediadas por outras partículas, outros tipos de quanta. Retomando uma antiga ideia do século XIX, o físico japonês Hideki Yukawa⁵ mostrou que podemos induzir a relação entre a massa do fóton e o alcance da interação eletromagnética. Tudo se passa como se o alcance da interação fosse inversamente proporcional ao valor de sua massa. Assim, entenderíamos por que o alcance da força eletromagnética é infinito: isso se deve ao valor zero para a massa da partícula — o fóton — que é intermediária da interação.

Da mesma forma, esperaríamos que o gráviton, a partícula que supostamente mediará a interação gravitacional entre dois corpos, também tivesse massa nula ou extremamente pequena para garantir o alcance infinito ou muito grande da força. Essa generalização se consubstancia na afirmação: *no nível quântico, toda força exercida entre dois corpos pode ser interpretada como a troca de uma ou mais partículas, o chamado quantum de interação. O alcance da força é inversamente proporcional à massa da partícula mediadora.*

A aplicação mais notável dessa propriedade ocorreu precisamente quando Yukawa a usou para representar o mecanismo das forças nucleares. Elas foram interpretadas como consequência da troca de partículas de massa diferente de zero — os píons ou mésons π — que possuíam alcance de interação pequeno, pois a massa do méson π efetivamente medida em laboratório é apreciável. Isso significa que os píons, de modo distinto dos fótons, são partículas pesadas. A experiência mostrou que o físico japonês estava certo em sua interpretação. Assim, foi-se levado a afirmar, por analogia, que, se o gráviton possui uma massa, ela deveria ser

extremamente pequena, dando assim à interação gravitacional um alcance bastante grande.

Entramos na terceira interpretação possível para a constante cosmológica: ela estaria relacionada à massa do gráviton. Ora, os cosmólogos estimaram para Λ um valor extremamente pequeno. Isso mostra uma possível coerência na hipótese de existência de uma relação entre a massa do gráviton e Λ , mas ainda não é suficiente para estabelecer alguma forma de relação.

Somos obrigados, para empreender essa tarefa, a penetrar a parte mais complexa, posto que técnica, de nossa questão, a saber: como associar a massa do gráviton à constante cosmológica? Talvez seja importante alertar o leitor para um detalhe que faz parte do jargão científico, mas que pode chocar aqueles que não estão a par dessas simplificações linguísticas.

Para que se possa identificar a massa do gráviton com Λ (a constante cosmológica), devemos, antes de qualquer teoria ou análise, encontrar um modo de relacioná-los, pois estamos tratando de duas constantes que não possuem a mesma dimensionalidade. O Λ , como vimos, é descrito como o quadrado do inverso de um comprimento, isto é, sua dimensionalidade consiste no inverso do quadrado de um comprimento. A massa $m(g)$ do gráviton deveria estar associada a uma quantidade com essa mesma dimensão. A questão aparece no quadro geral da teoria das partículas elementares — e ao se adotar a interpretação de Yukawa ela já havia aparecido. A dificuldade foi resolvida utilizando-se duas quantidades fundamentais capazes de realizar a ponte entre um comprimento e uma massa. Trata-se da constante de Planck (uma característica do mundo quântico) e da velocidade da luz. Escreve-se a expressão $m = \mu h/c$, onde h é a chamada constante de Planck, e a letra c representa a velocidade da luz. Essa relação permite, fazendo apelo aos mundos quântico e relativista, associar uma massa a qualquer grandeza de comprimento.

A demonstração definitiva de como se estabeleceu a relação entre a massa do gráviton e a constante cosmológica é um pouco técnica demais para ser apresentada aqui, mas devemos esboçar ao menos as linhas gerais ao longo das quais a relação foi estabelecida.⁶ Precisamos antes fazer um pequeno desvio para compreender qual é o estado fundamental da geometria a partir do qual a questão da massa do gráviton faz sentido.

¹ Einstein simbolizou a nova constante que introduziu pela primeira vez na cosmologia pela letra grega lambda (Λ), usada aqui em maiúsculo

² O gráviton ainda não foi detectado. Em verdade, no momento em que redijo estas notas, nem mesmo as ondas gravitacionais foram observadas diretamente. Enquanto a inexistência de grávitons

³ O gráviton ainda não foi detectado. Em verdade, no momento em que redijo estas notas, nem mesmo as ondas gravitacionais foram observadas diretamente. Enquanto a inexistência de grávitons não causaria grandes dificuldades formais à teoria da gravitação de Einstein, a não existência de ondas gravitacionais seria um golpe mortal em toda descrição atual envolvendo o tratamento do campo gravitacional.

⁴ Podemos citar duas dessas propriedades: a identificação do campo gravitacional com a geometria do espaço-tempo, e a não linearidade da gravitação, em contraste com a teoria linear do eletromagnetismo.

⁵ Na verdade, Yukawa se referia às propriedades dos mésons, partículas que seriam os intermediários das interações nucleares. Essa interação seria de curto alcance porque os responsáveis por sua propagação — os mésons — têm massa elevada, inversamente proporcional ao alcance da força nuclear.

⁶ O leitor pode consultar as referências citadas na bibliografia, em particular o artigo publicado em arXiv e referências ali citadas.

7. Cosmologias

Cosmologia segundo deSitter

Vimos que a geometria proposta por Einstein para descrever o Universo é estática. O Universo, a totalidade do mundo, deveria residir em seu ponto de equilíbrio e, assim, exibir ausência de movimento. O cenário proposto por Willen deSitter vai um passo além. Ele admite movimento, processo, uma evolução, mas esta deve ser estacionária, isto é, deve repetir indefinidamente a mesma configuração. Conserva-se a ideia primordial de Einstein de que o Universo procura estabelecer-se em seu ponto de equilíbrio, só que o ponto varia, não é necessariamente fixo. O Universo, em movimentação eterna, permanece em seu ponto de equilíbrio. A dinâmica não muda. A variação com o tempo existe, mas sua configuração, a cada momento, é sempre a mesma.

Em 1922, logo em seguida à elaboração do modelo de Einstein e de deSitter, surgiu a descrição de um Universo em expansão a partir de uma singularidade inicial, proposta pelo cientista russo Aleksandr Friedmann. Esse modelo expansionista trazia uma grande novidade, permitindo liberar a concepção do Universo de sua dependência com relação a um ponto de equilíbrio. Friedmann mostrava que era possível gerar, dentro de qualquer uma das duas teorias de Einstein da gravitação, um modelo cosmológico dinâmico, e que seu movimento — contrariamente à tradição — não constituía uma configuração de equilíbrio fundamental, mesmo que o movimento não fosse constante. Nós iremos examinar esse modelo mais adiante. Por enquanto, cabe apenas fazer o contraponto com a eternidade sem singularidade, sem criação, e com a mesma eterna aparência do modelo de deSitter.

A solução de deSitter

A solução da equação de Einstein descoberta por deSitter desempenha um importante papel na história da cosmologia e tem muitas consequências. Originalmente, essa geometria tinha uma função simples, mas formalmente importante: tratava-se de mostrar que a constante cosmológica introduzida por Einstein para produzir um modelo estático poderia ser empregada de modo análogo para alterar radicalmente essa propriedade, permitindo gerar também um Universo dinâmico particular.

Com efeito, no mesmo ano em que Einstein apresentava seu modelo, o holandês Willen deSitter exibia sua solução da equação RG-2 representando uma geometria desprovida de qualquer forma de fonte material. Tal geometria diferia da estrutura plana de Minkowski graças à existência de Λ . Os observadores fundamentais, nessa geometria, que se movimentam livremente (isto é, somente pela ação da gravitação) tinham a propriedade de observar uma estrutura espacialmente homogênea. Mais importante ainda, eles tinham a mesma visão dessa estrutura ao longo de toda a sua história. Isso significava que ela era também homogênea no tempo. Daí a expressão elegante, mas arrogante de Fred Hoyle — que, anos mais tarde, tentou identificar essa geometria como a de nosso próprio Universo: "Não apenas a geografia não importa [o Universo é espacialmente homogêneo], mas também a história não importa [o Universo tem a mesma configuração eternamente]."¹

Essa geometria foi usada em dois momentos especiais. Em um primeiro momento, numa tentativa explícita e curiosa de, seguindo os passos do modelo de Einstein, eliminar o tempo de sua descrição. Isso foi possível graças à propriedade dessa geometria de admitir uma categoria de observadores (caracterizados como fundamentais) que divide o mundo segundo um sistema de coordenadas gaussiano, no qual a totalidade é separada em três dimensões de espaço e uma dimensão de tempo. Essa geometria contém somente uma função temporal, denominada fator de escala e representada pelo símbolo $A(t)$. Assim, o volume total (dado pelo seu cubo) varia com o tempo. Essa função depende exponencialmente do tempo. Dito de outro modo, a variação de seu volume por unidade de volume é constante.

O observador privilegiado, que descreve o mundo homogêneo, vê a mesma configuração a cada instante, embora esse volume não seja constante no tempo. Trata-se, é claro, de uma configuração especial e que deSitter descobriu supondo que podemos considerar que a geometria do Universo não é afetada pela matéria, ou melhor, que o efeito de toda matéria existente é bastante inferior ao efeito de uma possível constante cosmológica, a ponto de que a ação da matéria total sobre a geometria possa ser desprezada.

A descoberta de Friedmann colocou a homogeneidade do espaço tridimensional como uma condição apriorística que a geometria em larga escala do Universo deveria possuir. Em cada momento, todos os lugares deveriam exibir as mesmas propriedades físicas. Na versão de Fred Hoyle, essa geometria admitia que "a geografia não importa". A solução de deSitter dá um passo além na homogeneização completa, argumentando que sua aparência temporal também não distingue um tempo especial. Tudo se passaria como se a geometria, embora variando com o tempo, seria de tal forma estruturada de modo a fazer com que a variação ocorresse de modo *steady state*, isto é, haveria uma variação do volume com o tempo, mas essa variação seria constante, isto é, sem aceleração. Uma variação permanente, eterna, sem nenhum momento especial capaz de distingui-lo de todos os infinitos momentos do tempo infinito de existência desse Universo.

Chegamos agora ao ponto que nos interessa. Ao considerar RG-2 como a boa teoria da gravitação e ao nos perguntar qual a sua solução fundamental, encontramos precisamente a geometria de deSitter. Ela aparece como uma solução do *vazio*, isto é, não requer uma fonte. A constante cosmológica, entendida como parte integrante da equação fundamental, é a responsável por tornar essa geometria distinta da de Minkowski.

As duas geometrias, tanto a de Minkowski quanto a de deSitter, constituem situações do *vazio*, isto é, não necessitam de matéria para que existam. Mas se ambas são geometrias *do vazio*, por que não são idênticas? Como podem ser distintas? Pois o que as caracteriza e as distingue é precisamente o fato de que elas estão associadas a teorias distintas: são estados fundamentais de duas teorias não equivalentes. Dito de outro modo, elas representam o comportamento absoluto do *vazio*. E esse comportamento, essa caracterização, depende da teoria que os descreve.

A massa do gráviton e Grande Lambda

Cabe agora concluir a argumentação pela qual Λ admite a interpretação em termos da massa de uma partícula fundamental. Essa interpretação é muito técnica, e dela traçarei somente as principais linhas. Os passos a seguir são:

- aceitar que as equações da gravitação são as descritas na teoria RG-2;
- considerar o modo de interação entre um campo massivo de spin-2 e a gravitação;
- descrever o estado fundamental do campo gravitacional como aquele associado à geometria de deSitter;
- perturbar fracamente esse estado fundamental de tal modo que possamos identificar a perturbação a um campo linear de spin-2, massivo, propagando-se na geometria de deSitter;
- comparar a equação do campo perturbado com a equação do campo de spin-2 massivo descrito no passo anterior.

Essa comparação tem como consequência a ideia de que a massa do gráviton é proporcional a Λ . Entretanto, a massa não provoca diminuição do alcance da interação gravitacional, posto que o argumento de Yukawa não se aplica quando a geometria não for a de Minkowski (sem curvatura).²

Cosmologia segundo Friedmann

Modelo padrão

Ao longo deste texto, descrevemos modelo cosmológico como uma solução das equações da gravitação especificando uma dada geometria riemanniana e a correspondente distribuição de energia-matéria que lhe dá origem. Antes de analisarmos o cenário padrão da cosmologia, convém tecer um breve comentário sobre a dualidade que a cosmologia encontra consubstanciada na disputa sobre suas origens, e que podemos simplificadamente representar na alternativa: big-bang ou Universo eterno? A maior parte dos dados observacionais é coerente com ambos os modelos. Entretanto, por razões ideológicas, um teorema "da singularidade" colocou o big-bang na moda desde a década de 1970 até os últimos anos do século XX, quando então o cenário de um Universo eterno começou a ser levado seriamente em conta. Pôr a cosmologia no caminho da inexorabilidade de um começo singular, esse foi efetivamente o começo da era do big-bang.³

Em 1922, o matemático russo Aleksandr Friedmann exibiu uma solução não estática das equações de Einstein, representando um Universo em evolução e que pode ser associado a uma deformação do espaço-tempo vazio de Minkowski, caracterizada por uma única função do tempo cósmico, o chamado fator de escala $A(t)$, que representa o que poderíamos chamar, de modo simplificado, de "raio do Universo". A velocidade de sua expansão é medida pela "constante" de Hubble, H , que depende somente da função $A(t)$ e de sua variação temporal. Quando H é positivo, temos uma fase em expansão; quando H é negativo, uma fase de colapso. A geometria de deSitter é definida pela condição de que H seja realmente uma constante. Nesse caso, a geometria varia com o tempo, mas a variação é ritmada, estacionária, repetitiva. Por essa particularidade, as simetrias da geometria de deSitter são bastante semelhantes às do espaço-tempo vazio de Minkowski, exibindo também o número máximo de simetrias permissível a uma estrutura quadridimensional.

A fonte da geometria de Friedmann é pensada em geral como um fluido contínuo, perfeito, caracterizado por uma densidade de energia ρ e uma pressão p que, pelas condições de homogeneidade espacial da geometria, só podem depender do tempo. Como, em geral, o fluido é considerado em sua fase de equilíbrio, segue-se que existe uma equação de estado relacionando a pressão e a densidade de energia. Quando essa equação é tal que vale a relação $p + \rho = 0$, isto é, quando a pressão for negativa e exatamente igual ao valor, com sinal oposto, da correspondente densidade de energia, vimos que o fluido representa o "vácuo cósmico" ou constante cosmológica.

Deve-se notar que, qualquer que seja a dimensão de $A(t)$, o parâmetro H tem a dimensão inversa de um tempo. Isso significa que a inversa de H caracteriza um tempo. Precisamente o valor $1/H$ medido hoje é considerado o "tempo de existência do Universo", isto é, a medida que nos separa de seu começo singular (quando o valor de A seria zero), ou do momento em que começa sua fase expansiva (quando o valor de A seria seu mínimo A_0).

Universo de Friedmann: versão simplificada

Para entender o discurso científico no qual a questão da origem do Universo adquire significado rigoroso e matematicamente abordável, vamos descrever, em primeiro lugar, o panorama considerado como o padrão da cosmologia.⁵

A teoria da relatividade geral, quando associada às observações astronômicas efetuadas no século XX, induz a uma caracterização do Universo no qual ele é descrito por uma estrutura espacial tridimensional homogênea (o que costumamos chamar de "espaço") evoluindo em um tempo cósmico global. A descoberta do afastamento regular das galáxias levou à convicção de que seu volume foi menor no passado, isto é, vivemos em um Universo que efetua um movimento global, único, solidário, de expansão. Esse quadro simplista permite-nos, de imediato, reconhecer um dos modos pelos quais a questão da criação do Universo foi colocada. Trata-se, então, da possibilidade de este raio $A(t)$ ter assumido o valor zero em um tempo finito, em nosso passado. Antes de continuarmos, porém, o exame da questão e para conhecermos com maior rigor, o alcance do

discurso cosmológico, é preciso identificar algumas hipóteses que lhe são subjacentes e compará-las com hipóteses correspondentes do Programa Cosmológico de Einstein. Cabe caracterizar melhor o tempo cósmico de que falamos e que constitui o panorama de fundo ao qual se refere a questão da criação.

Criação no tempo zero: de que tempo estamos falando?

Na descrição do Universo baseada em modelos do tipo proposto por Friedmann, um tempo global é selecionado graças à utilização de um sistema de coordenadas privilegiado. Trata-se da mesma hipótese de um tempo cósmico global do Programa Cosmológico de Einstein. É comum, na grande maioria das investigações cosmológicas, admitir-se *a priori* a existência de um sistema de coordenadas gaussiano global, isto é, no qual se institui a separação do mundo em uma estrutura tridimensional (o espaço) e uma estrutura unidimensional (o tempo). Alguns autores, ao argumentarem que tal escolha de representação é conveniente e possível, são induzidos a um pecado conceitual. Em lugar da aceitação apriorística dessa escolha arbitrária da estrutura do mundo, deveríamos procurar responder à questão: em que condições um tempo cósmico, global, comum a uma classe completa (isto é, aplicável a toda a variedade espaço-tempo) de observadores é possível?

A resposta à questão é conhecida e vem do estudo feito por Gauss das variedades diferenciáveis. Baseado nessa parte da matemática, é lícito afirmar que, embora seja sempre possível — em uma vizinhança de qualquer observador — estabelecer uma separação do mundo em espaço e tempo, a extensão do sistema para a totalidade do Universo depende de suas propriedades físicas, isto é, do comportamento em larga escala do campo gravitacional, de suas propriedades topológicas.

A representação gaussiana local é uma simples escolha conveniente de caracterização temporal dos eventos. Entretanto, a extensão para toda a variedade quadridimensional dessa representação — ou seja, a definição de um tempo único — não depende somente de uma escolha arbitrária, mas sim das características físicas em larga escala, globais. Assim, no Universo, em suas propriedades básicas, está inscrita a possibilidade ou não dessa

globalização do tempo. A descrição global, aquilo que chamamos de sua estrutura topológica, não é, assim, uma questão apriorística, mas uma característica do mundo, está impressa nele. Dito de outro modo, quando a estrutura geométrica do espaço-tempo admite a utilização de um tempo cósmico, é porque é possível definir uma classe de observadores (livres) fundamentais, cuja trajetória (isto é, a linha-de-Universo) pode ser representada ortogonalmente a uma dada superfície tridimensional que denotaremos pela letra grega Σ . Essa superfície separa o mundo em duas partes: pontos que estão no futuro de Σ (região F), e pontos que estão no passado de Σ (região P). A linha-de-Universo de qualquer observador intercepta a superfície Σ uma e somente uma vez. De modo simplista, pode-se dizer que essa propriedade implica a impossibilidade de retorno ao passado. O retorno pode ser identificado por uma trajetória que se fecharia sobre si mesma: o observador que por ela transitasse passaria duas vezes por um mesmo ponto do espaço-tempo (ver Figura 2).

Recentemente, a ideia de uma estrutura linear do tempo — de topologia semelhante à do conjunto dos números reais —, no qual o caminhar para o futuro implica necessariamente um afastamento do passado, tem sido posta em discussão. Embora não haja nenhuma evidência, mesmo indireta, de que exista uma estrutura cíclica — de topologia semelhante à do círculo, fechada sobre si — no Universo, uma série de artigos científicos publicados em revistas especializadas de física excitou o interesse a esse respeito. É importante situarmos a questão no quadro convencional da cosmologia. Iremos examinar um pouco mais detalhadamente um exemplo que se transformou em paradigma para a análise de questões causais, em que não existe tal tempo global. Trata-se do modelo de Universo girante proposto pelo grande cientista austríaco Kurt Gödel, em 1949.

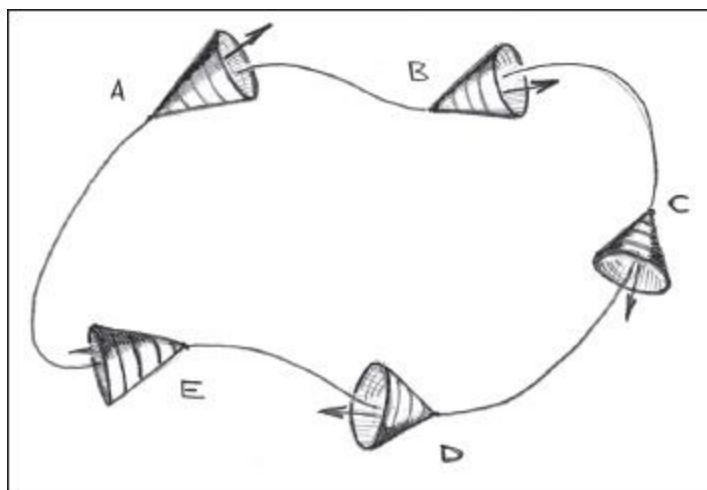


Figura 2

Curva do tipo-tempo fechada. Um observador coincidente com essa trajetória passa duas vezes pelo mesmo ponto do espaço-tempo.

A situação não é somente desagradável do ponto de vista do senso comum, como cria formalmente uma série de dificuldades que podem ser sintetizadas numa só questão: como construir, em um hipotético Universo de Gödel, uma superfície de dados iniciais (SDI) a partir da qual toda propagação de informação clássica poderia ser estabelecida? Gostaria de enfatizar que hoje não dispomos de informações suficientes sobre a existência ou não dessa superfície em nosso Universo. Com efeito, embora seja operação fácil eliminar a geometria de Gödel como representante da geometria de nosso mundo (como veremos no próximo capítulo), por outro lado, a existência de um só tempo cósmico global é ainda uma questão em aberto. Recentemente alguns autores investigaram as consequências da não existência desse tempo global e especularam sobre mecanismos práticos que podem viabilizar uma máquina do tempo, artefato capaz de nos conduzir ao passado.

Estamos acostumados a reconhecer que todo caminho espaço-temporal nos conduz ao futuro, *ipso facto*, nos afasta de nosso passado. Embora essa seja uma verdade local, a ausência da SDI implica que, em geral, isso possa não ocorrer — ou seja, haveria caminhos pelos quais, ao nos dirigirmos para o futuro, estaríamos nos aproximando de nosso passado. Esse aparente paradoxo só é compreensível quando entendermos o significado da

orientação temporal global, sua propriedade topológica, isto é, se devemos associar o tempo a uma linha reta ou a um círculo.

Tudo indica que nos resta a seguinte alternativa: ou aceitamos um compromisso apriorístico (que postularia a existência de uma SDI, deixando para uma decisão ulterior a eventual explicitação de alguma incoerência que resultaria desse apriorismo), ou nos lançamos rumo a uma transcendência da questão, através, por exemplo, da inclusão de considerações quânticas que eliminariam, em certas circunstâncias a serem precisadas, a própria estrutura clássica que chamamos de espaço-tempo, tornando-a uma quantidade conceitual não primitiva. Iremos adotar uma posição pragmática que parece bastante satisfatória, neste momento, para os cosmólogos: aceitar provisoriamente a possibilidade de definição de um tempo cósmico global no Universo. É isso que se faz no modelo de Friedmann.

Modelo de Friedmann modificado: a solução inflacionária

Embora estejamos interessados particularmente na questão da origem e criação do Universo, é útil informar ao leitor que, ao longo dos anos 1980, empreendeu-se uma revisão do quadro tradicional da cosmologia. A razão para isso está ligada às dificuldades de ordem prática ocasionadas pelas simplificações requeridas na elaboração do modelo de Friedmann.

Dentro dessa revisão, obteve grande sucesso, pelo menos formal, uma proposta que ficou conhecida pelo nome de modelo inflacionário. De um modo simplista, a ideia mestra dessa orientação consistia em aceitar a existência de um período não muito longo na história do Universo durante o qual seu processo de expansão seria controlado por forças do vácuo típicas daquelas associadas à constante cosmológica Λ . Consequentemente, a expansão, nesse período, seria extremamente rápida: passando de uma função potência $A = t^n$, com $n < 1$, para uma função exponencial $A = e^{\Lambda t}$. O Universo receberia, assim, uma enorme aceleração em sua expansão. Isso permitiria, pelo menos em princípio, resolver algumas questões sem resposta convincente ou apriorísticas no primitivo modelo friedmanniano.

É verdade que a proposta inflacionária provocou uma série de outras questões igualmente delicadas. Gostaria de chamar a atenção do leitor informado sobre o modelo inflacionário de que a questão da origem do Universo não foi aí resolvida. Em verdade, sequer foi tocada nessa proposta, identificando-se com o modelo convencional de Friedmann, no qual o Universo admite uma origem: ele teria sido criado, classicamente, a partir de uma singularidade inicial. Em seu sentido mais restrito é essa imagem explosiva inicial que tem sido vulgarizada com o curioso nome de big-bang

Essa visão, a um só tempo simplista e inacessível, foi ultrapassada nos últimos tempos tanto por versões clássicas quanto quânticas. Entretanto, o sucesso do modelo inflacionário pode ser atribuído não somente a questões de caráter técnico, mas também à sua ideologia, que permitiu entender a questão da origem, situando-a para além da necessidade do modelo. Isso foi obtido com a restrição ao conceito de Universo observável contido na ideologia que sustenta a proposta inflacionária. Gostaria de alertar ao leitor para o fato de que o cenário inflacionário não é uma necessidade formal da teoria, mas somente uma solução prática para certas questões astrofísicas. Os problemas fundamentais da cosmologia não foram resolvidos, mas, no dizer de seus seguidores, transcendidos, quer dizer, postergados.

Três momentos da cosmologia

Tivemos a oportunidade de examinar, mesmo que superficialmente, três importantes soluções das equações da relatividade geral, candidatas à geometria do Universo. Elas correspondem a movimentos de ideias que, por simplicidade, associaremos a cada um dos cenários que antes consideramos:

- modelo de Einstein: o Universo está em seu ponto de equilíbrio; não existe movimento global; a geometria é estática.
- modelo de deSitter: o Universo está em movimento permanente em seu ponto de equilíbrio eterno;
- modelos de Friedmann: o Universo está em movimento; não existe um ponto de equilíbrio; há uma luta de forças no mundo que determina sua expansão. Ou o Universo é eterno (essa luta é eterna), ou existe um começo há um tempo finito, inacessível, produzindo um cosmo irracional; a explicação do ponto de equilíbrio se faz às avessas: uma explosão deu origem a tudo-que-existe.

Vimos o papel que a cosmologia pode desempenhar ao transformar o olhar local da física em um modo global de examinar tudo-que-existe, envolvendo um Universo em evolução, variável no tempo. Isso gera novas questões, podendo até mesmo alterar radicalmente o que a ciência tem identificado como a imutabilidade das leis da natureza. É precisamente esse olhar que iremos examinar agora.

Cosmologia segundo Dirac

Dependência cósmica das interações fundamentais

O professor inglês Paul A.M. Dirac talvez tenha sido, depois de Einstein, o maior defensor da submissão da física à cosmologia, embora sua argumentação se baseie em um cenário totalmente diferente daquele sugerido pelo criador da relatividade geral. Sua originalidade quanto a essa questão pode ser atribuída ao modo pelo qual considerou a relação entre as duas ciências, invertendo o argumento que até então se usava. Os físicos tinham se ocupado de investigar, por meio das equações da gravitação de Einstein, as consequências produzidas pela matéria, sob qualquer forma, sobre a geometria global do Universo. Ao final da primeira metade do século XX, a proposta de Friedmann de um Universo em expansão, dinâmico, dependente do tempo cósmico, passara a ser considerada seriamente uma geometria capaz de representar a estrutura do Universo, em conformidade com o afastamento das galáxias observado por Hubble.

Poderíamos inverter essa hierarquia e perguntar quais seriam as consequências que a expansão provoca sobre qualquer tipo de matéria, incluindo a radiação eletromagnética, os fótons. Qual seria a resposta do Universo à expansão que a matéria lhe impõe? E de que forma essa reação poderia ser percebida? Sob que modos de influência no comportamento da matéria poderíamos detectar o efeito de retorno, a ação do Universo sobre a matéria que gera ou gerou o movimento de expansão?

Havia um modo elementar e até certo ponto trivial de responder a essa questão — e foi o que se fez em um primeiro momento. Para conhecer a influência da cosmologia, bastaria examinar o efeito da matéria submetida a um campo gravitacional espacialmente homogêneo e dependente somente do tempo cósmico. A observação de Hubble, a partir do desvio para o vermelho sofrido pela luz emitida de galáxias distantes, já produzira uma resposta simples e direta sobre essa influência.

Entretanto, contrariamente à forma principal, simples e bem convencional de análise, Dirac propôs um novo movimento de ideias, diferente, mais ambicioso, e estabeleceu um problema inesperado. Citando suas palavras:

Em geral admite-se que as leis da natureza foram sempre as mesmas que as atuais. Não há justificativa para isso. As leis podem mudar, e quantidades particulares que são consideradas constantes na natureza podem variar com o tempo cosmológico. Tais variações podem frustrar completamente os construtores de modelos.

Dirac criou um método para examinar as consequências da ação global da expansão do Universo, perguntando se as próprias leis da natureza que temos descoberto em experiências feitas em laboratórios terrestres e em nossa vizinhança — e de que trata a física — poderiam depender do estado do Universo. Em um modelo típico como o descrito no cenário padrão de Friedmann, a única dependência que poderia existir seria com o tempo cósmico.

Dirac fez então uma proposta original, extremamente simples, ingênua mesmo, argumentando que as propriedades da natureza poderiam variar com a expansão do Universo. Isto é, deveria estar embutido no corpo das leis fundamentais da física um efeito da resposta cósmica, que seria exibido por sua dependência temporal. Em particular, a constante de Newton, que determina a intensidade da força gravitacional, variaria com o passar do tempo. Ela se tornaria mais fraca à medida que o Universo envelhecesse.

Essa proposta constituía uma enorme especulação sem apoio observacional de substância. Tratava-se também de um desvio da linha principal de investigação da época, que se preparava para tornar possível a aceitação da cosmologia como ciência. Uma sugestão de caráter tão especulativo colocava a investigação em um caminho de difícil saída e não apoiava em nada a candidatura da cosmologia ao clube da ciência.

Podemos dizer que, se não fossem os trabalhos notáveis que Dirac tinha produzido no passado — e que lhe concederam um status de respeitabilidade na comunidade científica como cientista notável —, certamente a proposta não teria sobrevivido além do círculo íntimo de seus colegas. De qualquer modo, uma vez feita, ela passou a ser examinada por vários cientistas que a consideraram digna de análise.

De imediato, arguiu-se que isso provocaria um efeito especular, pois, se o Universo atua sobre aquele que atua sobre ele, não seria o caso de supor que estaríamos no limiar de produzir uma sequência sem fim de processos de ação recíproca? E se realmente fosse assim, isso que chamamos física se transformaria a todo instante. O que designamos por leis do Universo seguiria essas modificações? Seria possível que os processos físicos com que descrevemos a natureza, aquelas quatro forças fundamentais que já comentamos, deveriam levar essa característica global em consideração? Para exemplificar a situação, cabe examinar duas propostas.

Dependência cósmica da interação gravitacional

Em paralelo às discussões de caráter genérico que se seguiram à proposta de Dirac, e tomando um caminho prático, alguns físicos resolveram colocar em execução a ideia, tentando produzir consequências observáveis. Uma delas, em particular, ganhou notoriedade graças ao trabalho de físicos como Pascual Jordan e Robert Dicke, que tentaram reformulá-la dentro dos cânones que sustentam a relatividade geral. A proposta que teve mais sucesso e ainda hoje é investigada seriamente foi a versão sugerida pelos norte-americanos Robert Dicke e seu colaborador Carl Brans. Em vez de pensar um efeito cósmico sobre a física local, esses autores sugeriram mudar aquilo que sustenta e dá conteúdo formal à própria cosmologia. Eles propuseram mudar a teoria de Einstein da gravitação, introduzindo em seu corpo formal uma suposta dependência temporal, tal como sugerida por Dirac. Isso, por sua vez, produzia uma mudança na própria cosmologia.

Para sair desse círculo formal, propôs-se uma estrutura autoconsistente e integral, em que local e global estivessem de tal modo entrelaçados que seria impossível entendê-los, na visão de Dirac, como aspectos distintos. Do ponto de vista prático, no que diz respeito à cosmologia, as consequências de tal teoria escalar-tensorial da gravitação não são muito diferentes da relatividade geral. Assim, nós não nos iremos ocupar mais dela aqui, fazendo somente um comentário adicional: outras formas envolvendo campos escalares irão, a partir de então, aparecer seguidamente na cosmologia, permitindo a formulação não somente de modelos inflacionários, mas de cenários de Universo eterno, sem começo e sem fim.

Dependência cósmica da interação eletromagnética

Outra possibilidade examinada estava relacionada com a variação da intensidade da força eletromagnética. Isto é, tudo se passaria como se a força eletromagnética entre dois elétrons, por exemplo, variasse com o passar do tempo cósmico.

Embora em um primeiro momento, na década de 1950, a proposta tenha sido rejeitada, há pouco tempo alguns astrônomos a recuperaram, e ainda hoje se procura algum tipo de efeito que essa variação possa produzir e que seja observável.

Dependência cósmica da interação fraca

Um terceiro exemplo do modo possível de resposta dos processos físicos para a expansão do Universo surgiu no começo dos anos 1970. Embora tenha sido esquecida por mais de 30 anos, ela passou por uma ressurreição no início do século XXI. Vamos comentá-la brevemente para conhecer esse outro mecanismo segundo o qual a estrutura global do Universo pode afetar o modo como diferentes partículas se transformam, por desintegração, umas nas outras. Para entender como isso é possível, precisamos examinar, mesmo que superficialmente, alguns aspectos do mecanismo da força responsável pela desintegração da matéria que constitui a força nuclear fraca.

Consideremos, por exemplo, o processo pelo qual uma partícula como o méson mu, ou, como é chamada simplificada, o múon, decai, gerando um elétron e dois neutrinos. A propriedade mais notável desse processo está ligada ao fato de que ele viola a paridade. Isso significa, em termos simples, que o processo — contrariamente ao que acontece na interação eletromagnética — não se dá invariante por reflexão especular.

Contrariamente à força eletromagnética — cuja dependência cósmica só poderia aparecer na variação da intensidade de sua ação —, no caso da interação fraca, além dessa possibilidade, há uma outra forma de dependência cósmica: a dependência temporal de violação da paridade, que poderia não ser a mesma para qualquer época, mas variar com a expansão

do Universo. De modo prático, isso teria como consequência o fato de que a taxa de decaimento da desintegração do múon não seria constante ao longo da história do Universo. A variação afetaria inúmeros observáveis e, em particular, a quantidade de certas substâncias no Universo, como, por exemplo, a quantidade do elemento químico hélio. Isso serve para colocar limites à dependência cósmica, mas permite alterar muito algumas formas de compreensão da matéria existente no Universo.

Por outro lado, dada a relação entre as interações, a dependência cósmica afetaria qualquer programa de unificação das forças.

Dependência cósmica causada pelo acoplamento matéria-gravitação⁶

Outra forma de alteração do comportamento da matéria causada pela evolução do Universo está ligada ao modo pelo qual a matéria interage com a gravitação. Essa forma não é dada por nenhuma teoria geral, mas pela aceitação de certos princípios básicos que qualquer interação deve satisfazer para ser compatível com as leis da física.

O princípio de equivalência tem sido usado como guia importante e extremamente prático na elaboração desses modos de acoplamento. Entretanto, ele não é a única forma adequada a leis e princípios mais fundamentais, tais como o princípio de covariância. Segundo esta última, os modos de interação devem ser tais que não dependam do particular modo de descrição, ou escolha de referencial, ou sistema de coordenadas para sua descrição. Dessa forma, é possível descrever o processo de interação como dependente da curvatura do espaço-tempo.

Ao elaborar um cenário como esse, de interação não mínima, mostrou-se, no final dos anos 1970, que um Universo cheio de fótons que satisfazem essa forma de interação provoca modificações drásticas no comportamento da geometria deste Universo. Em particular, certas formas de interação são capazes de impedir a existência de uma singularidade inicial, produzindo um cenário em que a atual fase expansionista do Universo teria sido precedida por uma fase de contração. O colapso inicial seria interrompido graças a um mecanismo interno da interação entre campo eletromagnético e campo gravitacional, e produziria um modo clássico — isto é, não quântico

— de evitar a singularidade típica dos modelos de Friedmann. Esse Universo eterno, cujo começo estaria separado de nós por um tempo infinito, produz certamente uma visão bastante diferente daquela do modelo padrão.

¹ "Geography does not matter and history does not matter", Fred Hoyle, 1946.

² O leitor pode acompanhar os aspectos técnicos dessa argumentação nos trabalhos citados (Novello-Neves).

³ Embora o big-bang tenha uma história mais antiga, ela realmente só dominou por completo o pensamento da grande maioria dos cosmólogos ao final dos anos 1970.

⁴ Serei muito breve nessas considerações de caráter geral — sugerindo ao leitor interessado em mais informações a consulta às referências enumeradas na bibliografia.

⁶ Ver, por exemplo, Mário Novello e J.M. Salim, *Physical Review D*, 1979.

8. Mitos cosmogônicos

Mito científico de criação¹

Apresentar um cenário da criação do mundo que envolva a descrição, nos menores detalhes, dos formidáveis eventos que forjaram de uma vez e para sempre o nosso mundo é uma tarefa à qual, desde os tempos mais remotos, todas as civilizações se dedicaram. Em torno da descrição desse momento mágico e único identificado com o começo de tudo-que-existe, as diferentes sociedades produziram mitos cosmogônicos que caracterizariam o momento mais sublime a que se poderia ter acesso. A ciência clássica, estabelecida à luz da física newtoniana, impedia um equivalente científico dessas cosmogonias, pois suas estruturas mais fundamentais, o espaço e o tempo — sobre as quais se construiu a ideia de Totalidade —, constituíam nada mais que um simples palco, um cenário eterno, estático e imutável em que os eventos se desenrolariam obedecendo às leis da física.

Entretanto, as enormes e profundas mudanças surgidas no século XX, em um formidável esforço teórico-observacional, demonstraram claramente que o Universo deve ser entendido como um processo. Isso significa que, contrariamente ao que os físicos pensavam até a primeira metade do século XX, vivemos em um mundo dinâmico, caracterizado pela variação da totalidade do espaço tridimensional com o tempo cósmico. Assim, o volume total do espaço foi menor no passado e aumenta com o passar do tempo. Dessa observação deriva uma questão natural: quão pequeno foi ele? A partir desse estudo, surgiu a possibilidade de pensar um momento único de criação de nosso Universo a partir de um volume mínimo nulo. Estabeleceu-se assim, ao longo dos anos 1970, a hipótese de criação singular do mundo através do que teria sido uma "grande explosão inicial", popularizada com o sugestivo e curioso nome de big-bang.²

Recentemente, os cosmólogos foram além dessa visão simplista, criaram-se cenários alternativos para representar diferentes modos de criação do cosmo. Essa multiplicidade reproduz, no plano mais global da ciência, diferentes formas de olhar o Universo. Alguns dos cenários se organizam em discordância com os conceitos newtonianos com os quais construímos um discurso cotidiano sobre o mundo — chegando mesmo a tornar sua compreensão formal em termos convencionais extremamente problemática. Poderíamos esperar que, dentre esses diversos modos de criação, fosse surgir um único, mais eficiente que os demais, e que ele pudesse produzir uma visão do mundo que admitisse uma tradução em termos simples e corriqueiros, isto é, aqueles com os quais descrevemos os fenômenos cotidianos ao nosso alcance, típicos da física newtoniana. Mas, é necessário que se diga, essa não parece ser hoje a situação mais viável.

Devemos nos preparar para aceitar o aparecimento de uma cosmologia que indique o modo de formação deste Universo utilizando — para descrever propriedades que estão e estarão possivelmente para sempre fora do alcance de nossa experimentação cotidiana — uma linguagem, um conjunto de símbolos, para representá-las, que não está associada ao *dialeto newtoniano* com o qual produzimos, a partir de nosso olhar, um discurso cotidiano sobre os fenômenos físicos.

Assim, inesperadamente, como consequência natural do uso continuado e sem limites do modo racional de descrever a natureza, os cosmólogos oferecem uma descrição completa do Universo. Isso se daria por meio de uma formulação intrínseca, numa linguagem simbólica especial, no interior da cosmologia, e à qual aquele cujo olhar está fora do território dessa ciência só pode ter acesso por metáforas. É nesse lugar, limítrofe e de delicado acesso, que uma descrição nova do Universo aparece — produzindo uma prática que leva ao abandono daquele modo convencional, newtoniano, de descrever a natureza — e que vai além, transcende o cenário do big-bang, esse modo definitivo e irracional de produzir aquilo que designamos como um mito científico de criação do mundo.

Antes de considerarmos a descrição dos modos de criação do mundo que a ciência vem produzindo nos últimos anos, talvez fosse conveniente fazer um breve comentário para situá-la em uma perspectiva histórica. A ciência, em seu empenho natural e extremamente eficiente de dessacralizar o

mundo, realiza — pelo menos assim se pensava — uma atividade que o germe da produção de mitos cosmogônicos parecia não poder penetrar. Ao contrário, a ciência quis sempre ser entendida como produtora de certezas, verdades, visões do mundo momentâneas — mas em cada momento definitivas — que agiriam como poderosos instrumentos, verdadeiras máquinas de guerra, com o objetivo explícito de diminuir, reduzir, destruir os valores dos mitos tradicionais, caracterizando-os como falsas descrições do mundo e, assim, fazendo-os recuarem para os territórios da fantasia. Mais que isso, procura retirar qualquer valor que a sociedade lhes poderia conceder.

Trata-se, é claro, de uma atitude política. Desse modo, parecia extremamente difícil imaginar que essa mesma ciência, nos dias de hoje, no núcleo mais duro de suas certezas, ao gerenciar o comportamento dos agentes materiais do mundo, pudesse se aproximar — mesmo guardando uma longa distância formal e cercando-se de múltiplos cuidados — do momento das tradições das civilizações mais antigas, produzindo igualmente, em seu interior, uma descrição do modo pelo qual o mundo teria sido formado. Pois os que assim pensavam estavam enganados.

Hipótese do big-bang como começo do mundo

Um historiador da ciência que quisesse descrever com seriedade a situação da cosmologia dos anos 1970 até a metade dos anos 1990 certamente terá enormes dificuldades em explicar as verdadeiras razões pelas quais os cientistas deixaram que os meios de comunicação do mundo todo propagassem uma versão fantástica e errônea: a de que eles, cientistas, teriam demonstrado que o Universo em que vivemos teve um momento único de criação afastado de nós por uns poucos bilhões de anos.

Em verdade, a partir da observação fantástica e grandiosa — talvez sem paralelo na história da humanidade, pelo menos no que diz respeito ao olhar científico sobre a totalidade do que existe — feita pelo astrônomo Edwin Powell Hubble, de que vivemos em um Universo dinâmico, não estático, caracterizado pela variação do volume total do espaço tridimensional com relação ao tempo, concluiu-se naturalmente que nosso Universo sofreria um processo de expansão. Isto é, o volume total do espaço aumentaria com o passar dos tempos. Uma medida da velocidade da expansão permite determinar que, se extrapolarmos o movimento para o passado — e se as condições gerais do comportamento global não se alterarem —, pode-se chegar a um momento, afastado de nós uns poucos bilhões de anos, em que o volume total do espaço teria assumido o valor zero.

Ora, se aquelas condições idealizadas pudessem ser realmente extrapoladas para o passado, a situação crítica estaria beirando a irracionalidade, posto que, no "ponto singular de criação", todas as quantidades físicas atingiriam o valor infinito. Como consequência, nenhuma informação poderia ser dali retirada.

Pode-se concluir daí que o Universo ulterior não poderia ser racionalmente deduzido a partir de suas características iniciais, tudo-que-existe dependeria de um modo inacessível daquele instante primordial. Isso significa que o programa maior da ciência, a saber, fornecer uma descrição racional completa da natureza, não poderia ser levado adiante precisamente em sua parte mais fundamental: a questão cosmológica.

Entretanto, os cientistas estavam longe de poder afirmar que a extrapolação era verdadeiramente permitida. Uma análise mais aprofundada do que teria ocorrido naqueles momentos em que o Universo estava muito concentrado, e seu volume, por conseguinte, incrivelmente pequeno comparado com as dimensões com que lidamos de hábito na ciência, mostrou que, longe de podermos tratar aquele momento como um "começo", ali estariam ocorrendo complexos processos, de um grau de sofisticação tão grande que se deveria empreender um salto na visão científica do Universo.

Pequeno histórico

O modelo cosmológico de Friedmann possui uma singularidade, um momento em sua evolução no qual todo o volume espacial está reduzido a um ponto. Em linguagem mais simples, segundo esse modelo, o Universo possui um começo. Isso quer dizer que, há alguns poucos bilhões de anos, tudo-que-existe estaria concentrado em um ponto, todas as quantidades físicas alcançariam aí o valor infinito, seria impossível medi-las. Nenhuma informação poderia ser extraída daquele ponto singular.

Desde que se tornou pública, em 1922, até os primeiros anos da década de 1960, os cosmólogos tratavam a propriedade desse modelo como seu ponto mais fraco, aquela característica que o tornava de difícil aceitação. Com efeito, se o Universo teve tal começo, em que as quantidades fisicamente relevantes adquirem valor infinito — e, conseqüentemente, não podem ser medidas —, isso significa que a história do Universo depende de um momento inacessível, do qual não é possível extrair informações que permitiriam produzir uma história racional completa do mundo. Em outras palavras, seria impossível tratar o Universo como um sistema físico de acordo com os cânones com que estamos acostumados na ciência e que deveriam obedecer a uma sistemática de descrição convencional, constituída de três etapas complementares:

- obtenção, pela observação, de dados iniciais;
- aplicação de equações descrevendo a dinâmica, capazes de produzir a evolução desses dados;
- comparação entre os dados futuros, assim teoricamente obtidos, com a observação.

No modelo singular do Universo a cadeia causal estaria rompida, e para sempre, posto que os dados iniciais não seriam acessíveis. Cabe observar que esse resultado não depende da aparelhagem técnica disponível. Não podemos ter a menor esperança de que uma tecnologia futura possa contornar essa dificuldade. A conclusão é definitiva: se o modelo de

Friedmann é a verdadeira descrição da geometria, ou, de um modo mais geral, se o Universo teve uma origem singular separada de nós por um tempo finito, podemos concluir que não há possibilidade de produzir uma história racional, completa, a partir daquele começo. Dessa argumentação surge uma consequência dramática: um Universo singular não admite uma racionalidade completa, ou seja, sua história completa é irracional.

Seria de esperar que essa questão — isto é, a elucidação da natureza singular ou não do Universo — tão cheia de consequências, essencial para o estabelecimento de uma cosmologia racional completa, ocupasse a maior parte das análises dos cosmólogos. E assim realmente ocorreu até a segunda metade dos anos 1960. A partir de então, essas dificuldades foram abandonadas. Por quê? Embora elas não tivessem sido resolvidas e continuassem existindo — o modelo padrão de Friedmann adquiria cada vez mais sustentação observacional —, a dificuldade de princípio do modelo foi deixada de lado. A razão para isso tem uma história curiosa sobre os mecanismos de aceitação de um modelo como verdade científica.

Os teoremas da singularidade

Em 1964, o matemático inglês Roger Penrose publicou um teorema que foi logo seguido por vários outros, de diferentes autores, todos com teor semelhante e procurando resolver definitivamente a questão da singularidade inicial. Faziam isso pela demonstração de que sua presença — a existência de um momento de criação no modelo de Friedmann — não tinha caráter especial, não era uma propriedade desse modelo específico, mas era *genérica*. Como entender esse qualificativo aplicado à cosmologia?

A questão, colocada de modo a ser tratada por uma intervenção matemática, consistia em saber se a característica especial do modelo de Friedmann — exibir uma singularidade inicial — seria uma propriedade indesejável típica, presente em todas as soluções das equações da relatividade geral ao serem aplicadas ao Universo, ou seria particular a essa geometria, eventualmente relacionada ao fato de que possui uma alta dose de simetria. Dito de outro modo, a singularidade seria típica de qualquer modelo cosmológico expansionista ou uma consequência da hipótese segundo a qual o Universo é espacialmente homogêneo e isotrópico?

Outros cenários, outras soluções das equações de Einstein da gravitação, outras geometrias, possuindo características menos especiais, mais genéricas, contendo menos simetrias, seriam mais realistas? Estariam elas livres desse pesado ônus de possuir uma singularidade inacessível?

Durante muito tempo pensou-se que esse "defeito" da solução de Friedmann poderia ser contornado mudando-se a geometria do Universo, abdicando daquelas condições especiais do modelo. Alguns cientistas, no começo dos anos 1960, sugeriram que se deveria considerar o modelo de Friedmann válido apenas em uma fase posterior, e que ela poderia ser antecedida por uma geometria diferente — que evitaria a singularidade, graças a propriedades mais genéricas.

Esse foi um período de intensa atividade na busca da solução que, de um só golpe, resolveria duas questões cruciais: evitaria a singularidade e, por ser menos simétrica que a geometria de Friedmann, possivelmente lançaria

luz sobre a origem da alta dose de simetria e homogeneidade que o Universo hoje possui. Esse período durou pouco, pois logo em seguida, em 1964, com o advento dos teoremas de singularidade, mudou-se radicalmente o modo de tratar a cosmologia.

Aceitar que essa questão, que estava e continua a estar no centro da cosmologia, que talvez seja a mais fundamental, fosse resolvida por uma argumentação produzida graças a um expediente matemático, essa foi uma curiosidade histórica ímpar, incomum na ciência. A situação seria impensável, inimaginável, na primeira metade do século XX. Dificilmente se imaginaria que os físicos que tratavam àquela época do problema pudessem conceber a intervenção tão violenta e radical dos matemáticos nessa análise a ponto de propor uma solução tão inusitada: um teorema para esclarecer a origem do Universo!

Entretanto, foi exatamente o que aconteceu. A singularidade inicial do Universo foi tratada como um problema capaz de ser resolvido com uma análise formal feita pela demonstração de um teorema. Isso só foi possível graças a uma ideologia que se disseminou entre os cientistas, de que deveriam se afastar da questão fundamental sobre a origem do Universo para permitir a entrada da cosmologia no rol das ciências.

Já discuti longamente esse tema,³e quero somente lembrar que se, por um lado, os cientistas acumulavam observações astronômicas de apoio ao modelo de Friedmann, por outro, uma profunda *malaise* se instalara com relação à existência do momento singular exibido nessa geometria. Foi em tal ambiente de perplexidade que os matemáticos foram recebidos com grande alívio, pois eles traziam, com suas argumentações formais, a demonstração de que a singularidade era afinal inevitável, que deveríamos conviver com ela, que não havia nada de errado com o modelo padrão, que suas propriedades — inclusive esta desagradável, a presença de uma singularidade inicial — não eram um defeito seu, particular dessa geometria, mas parte inerente à teoria da relatividade geral e às propriedades da matéria convencional. Em circunstâncias bem menos especiais, menos simétricas que as exibidas por esse modelo, outras geometrias possuem igualmente a desconfortável situação, a existência de uma singularidade.

Seguiu-se então um período que se caracterizaria como de extrema confusão formal. Propostas de todos os lados, as mais estranhas possíveis, eram feitas e discutidas. Uns procuravam impor mudanças não na geometria, mas muito mais profundas, na própria teoria. Alguns sustentavam que se deveria conviver com a ideia da singularidade e o fato de que ela era inevitável, enquanto outros, ainda, pretendiam mudar aquilo que podemos chamar de "uma propriedade típica do Universo". A lista é imensa.

A mais simples, a razão menos afastada da prática tradicional, acabou por se impor: examinar se todas as condições de utilização do teorema seriam válidas em nosso Universo! Foram necessários mais de 20 anos para que a força desses teoremas se reduzisse à sua verdadeira dimensão, isto é, como uma verdade matemática, cuja consequência sobre o mundo real deveria ser antecedida pelo exame e correspondente conhecimento da aplicabilidade de suas premissas ao nosso Universo, tornando significativa, possível e eficaz a sua aplicação. Que isso tenha demorado tanto tempo, essa é uma questão que compete ao cientista social esclarecer.

Da aceleração do Universo à singularidade

Desde a segunda metade dos anos 1990, ocorreu uma profunda mudança de atitude da comunidade científica em relação à identificação do cenário do big-bang, com a presença de uma singularidade inicial — que imporá uma barreira intransponível, limitando o discurso científico sobre o Universo. Na virada do século XXI, contudo, uma descoberta tornou-se decisiva para que os modelos de Universo eterno deixassem de ser vistos como alternativos e passassem a ser considerados convencionais pelo *establishment*.

A razão dessa mudança de atitude não é difícil de se compreender. Para isso, precisamos rever, mesmo que superficialmente, algumas características que envolveram a elaboração dos teoremas da singularidade. Como a questão é por demais técnica para ser tratada aqui, me limitarei a algumas considerações simples, em particular ao cerne da argumentação de base que irá servir para esclarecer nossa questão.

Pressões negativas

As simetrias do modelo de Friedmann reduzem as equações da relatividade geral a somente duas, envolvendo precisamente duas funções que dependem apenas do tempo global:⁴ a densidade de energia $\rho(t)$ e o parâmetro de expansão $H(t)$. No modelo padrão, baseado na geometria de Friedmann, a função H assume o valor infinito, no momento do big-bang, no instante zero. Para que isso não ocorresse, seria preciso haver pressões altamente negativas, de modo a evitar a divergência da expansão. Em particular, a possibilidade de uma fase anterior, de colapso global do Universo, seguida da atual fase expansionista, exigiria que o valor de H naquele momento de mudança de um regime colapsante para um regime expansionista fosse não infinita, mas zero! Ora, isso equivale a propriedades pouco usuais da matéria, que os físicos não estavam dispostos nem preparados para aceitar; em particular a presença de pressões negativas que controlariam o modo de evolução da geometria.

A situação poderia ser resumida da seguinte forma: do lado do "cenário padrão", uma grande maioria recusava-se a aceitar a presença das pressões negativas; de outro lado, alguns poucos cientistas examinavam modelos nos quais essas propriedades materiais apareciam como representações de cenários envolvendo matéria descrita por campos não lineares. A ausência de argumentos capazes de convencer uns e outros sobre a conclusão de uma ou outra dessas posições, deixou a questão em aberto durante um bom tempo. No início do século XXI, um acontecimento inesperado interferiu fortemente na análise, dando respeitabilidade à argumentação até então caracterizada como alternativa.

Observações efetuadas em supernovas revelaram que essas estrelas parecem ter um comportamento bastante esdrúxulo, incompreensível para os astrônomos, a menos que essas propriedades estivessem nos informando que o Universo, contrariamente ao que se poderia esperar dentro do cenário cosmológico padrão, teria entrado, em época recente, em uma fase acelerada. Seu fator de escala, que determina a variação do volume espacial, não mais diminuía a intensidade da expansão, mas, ao contrário, acelerava sua variação.

Entrou-se então numa fase febril de inúmeras propostas novas referentes ao comportamento da matéria-energia responsável pela curvatura do Universo. Todas as propostas, para se tornarem eficientes e compatíveis com as observações, deveriam ter uma característica comum, precisamente aquela que imprime à geometria do Universo o caráter observado da sua aceleração: deveriam permitir a produção de pressões negativas, pois as equações de Einstein relacionam diretamente a aceleração do Universo com o sinal (positivo ou negativo) da pressão.

Podemos assim resumir a fase atual da cosmologia com a seguinte afirmação: se for verdadeira a interpretação da observação de estrelas supernovas, segundo a qual o Universo entrou em uma fase acelerada, e que as equações da relatividade geral são aplicáveis ao Universo, então, para funcionar como fonte dessa aceleração, o fluido perfeito deve possuir pressão negativa.

O leitor já pode ter concluído, a partir desse comentário envolvendo a aceleração do Universo, que se traz para o território das propostas aceitáveis pelos cientistas a condição de existência de um valor mínimo

diferente de zero para o volume do Universo. Tanto em um caso quanto em outro, ambas as condições apontam para a mesma propriedade da matéria, a saber a presença de pressões negativas, que se foi obrigado a aceitar (ver *Comentário* adiante).

Na questão da singularidade inicial, a ausência de observações da fase extremamente condensada do Universo levava à alternativa entre existir ou não um começo singular (caso em que a pressão teria de ser sempre positiva), ou de uma passagem suave de uma possível fase colapsante para a atual expansionista (quando a pressão passaria por um domínio em que ela seria negativa), para uma argumentação formal, teórica. A presença da aceleração trouxe respeitabilidade formal aos fluidos com valor de pressão altamente negativo. Assim, curiosamente, vindo de um território longínquo do problema da singularidade inicial, surgiu a aceitação de se considerarem as propostas de um Universo sem singularidade, possivelmente eterno; e até mesmo mais, como um bom concorrente à descrição do comportamento da fase primordial da atual era de expansão que o Universo possui.

Comentário

Como falei anteriormente, meu propósito neste ensaio não é apresentar um resumo das linhas de investigação que os cientistas têm desenvolvido, embora eu seja obrigado, aqui e ali, a fazer alguns comentários técnicos para que possamos entender o discurso da cosmologia. Algumas questões envolvendo trabalhos recentes — análises formais para além do horizonte observável, extensão do número de dimensões do espaço-tempo, e outras —, que possuem certamente interesse, são deixadas de lado neste livro, pois elas não tornariam mais eficaz nem mais completa nossa tarefa e, ao contrário, nos afastariam dela.

¹ Este capítulo baseia-se em conferência dada na Fundação Eva Klabin Rapaport, no programa *Humanismo em crise?*

² A imagem de uma explosão identificada muitas vezes com o cenário cosmológico chamado big-bang é errônea. Uma explosão é representada como um fenômeno que possui uma origem, um centro, e a partir da qual alguma forma de processo físico se propaga. Nada se assemelha com o big-bang, pois a geometria desse Universo é espacialmente homogênea, isto é, possui as mesmas

propriedades em todos os seus pontos; por conseguinte, não tem um "centro" espacial característico de um processo explosivo. O big-bang é um processo diferente, no qual todo o espaço passa a existir homogeneamente a partir de um único tempo de origem.

³ Mário Novello, *Cosmos et contexte*, op.cit

⁴ Por simplicidade, estamos considerando a existência de uma relação que determina a pressão p em termos da densidade de energia.

9. Cosmologia segundo Gödel

Meu interesse em apresentar aqui o modelo de Universo elaborado por Kurt Gödel está relacionado ao fato de que ele é um exemplo contundente de um cenário cosmológico que não aceita o apriorismo de Einstein, quando este postulou a existência de um tempo global. Nessa geometria — solução exata das equações de Einstein da gravitação —, a separação do mundo quadridimensional em três dimensões de espaço e uma de tempo não pode ser estendida para todo o espaço-tempo.

A comunidade dos relativistas sempre considerou esse modelo com grande incômodo. Não é de estranhar que um dos cosmólogos norte-americanos mais famosos, H.P. Robertson, tenha-se referido, em sua intervenção sobre a geometria de Gödel, no *Cinquentenário da Teoria da Relatividade*, na cidade suíça de Berna, em 1956, do seguinte modo: "Considero um defeito das equações da relatividade geral o fato de que elas permitam tal solução." Assim, a proposta de Gödel para gerar um movimento capaz de fugir ao quadro convencional da cosmologia foi considerada um "defeito teórico" das equações da relatividade geral, que deveria ser eliminado, colocado à margem, posto que indesejável!

No entanto, eu ousaria dizer que o momento mais original de toda a história da cosmologia moderna, no que diz respeito ao tratamento da questão do tempo, ocorreu precisamente com a entrada em cena do matemático austríaco Kurt Gödel. Sua temática é tão especial, tão estranha, tão pouco comum que, embora passados mais de 50 anos desde sua formulação original, ainda hoje ela ocupa um lugar de destaque no pensamento científico sobre o Universo. Com relação ao problema do tempo, não seria exagero afirmar que nada semelhante aconteceu na cosmologia, nem antes nem depois.

Para entender o que é tão singular no ponto de vista de Gödel e por que ele é tão difícil de conciliar com as ideias convencionais, basta dizer que esse modelo cosmológico é o exemplo mais famoso de violação global da causalidade — mantendo, no entanto, em cada ponto do espaço-tempo, a causalidade local —, sem que nenhuma lei da física seja desrespeitada.

Embora reconhecido imediatamente como incompatível com algumas propriedades observadas, tal como a expansão do Universo, o modelo ainda assim despertou enorme interesse na comunidade científica e mesmo além dela, constituindo verdadeiro paradigma da possibilidade de conciliar a ciência com a ideia de caminhos que levam ao passado. A razão para isso relaciona-se a algumas particularidades da proposta de Gödel no contexto cosmológico que, de imediato, a tornaram especial. A particularidade que teve consequências mais contundentes foi o abandono, na construção de seu modelo de geometria, do apriorismo paradigmático da existência de um tempo cósmico global. Deliberadamente ou não, essa escolha levou à produção de um cenário de ordem cósmica completamente fora do contexto convencional.¹

O sistema usado para tratar e descrever os acontecimentos no mundo valia-se, desde a descrição unificada feita por Minkowski, no começo do século XX, da separação do mundo na configuração caracterizada por uma estrutura que possuía três dimensões de espaço e uma de tempo. Vimos como o modelo padrão se apoiava precisamente sobre essa separação — conhecida como $3 + 1$ — realizada na geometria de Minkowski graças às propriedades da descrição de uma variedade feita por Gauss.

Gödel rompeu com essa tradição. Abandonou a hipótese de que a cosmologia deve ser escrita usando-se um tempo cósmico único, global, comum a todos os observadores. Criou, assim, um modelo que, embora com a mesma distribuição de energia/matéria utilizada na formulação do Universo de Einstein, e incluindo a mesma constante cosmológica que este havia introduzido, possui propriedades radicalmente diferentes. Entre elas, a que mais singularizou seu modelo consiste na existência de curvas do tipo-tempo fechadas, conhecidas pelas iniciais do termo em inglês, *closed timelike curves*, CTC. Em outras palavras, caminhos que levam ao passado.

Tempo no Universo de Gödel

O elemento principal na análise feita por Gödel da questão cosmológica é o tempo. Para ele, o cenário iniciado por Einstein, ao demarcar as fronteiras e estabelecer os fundamentos da cosmologia, tinha como objetivo a tentativa de eliminação do tempo da descrição do Universo.² Por que essa eliminação servia à visão einsteiniana do Universo? Por diversas razões que tivemos a oportunidade de considerar ao longo da nossa análise, mas que podem ser sintetizadas em uma só frase: trata-se de uma versão científica da argumentação derivada de Platão de um mundo ideal, sem necessidade de movimento. Para onde deveria caminhar um Universo perfeito? E por quê? Essas questões, latentes no cenário colocado por Einstein, foram rejeitadas *a priori* por Gödel. Mas, no caso de sua análise, não foi uma observação da natureza — como a que sustentou o modelo de Friedmann — que apoiou a iniciativa da crítica ao imobilismo einsteiniano. Não. Para Gödel, era a própria estrutura do tempo, independentemente do contexto cosmológico, que estava em causa e devia ser examinada.

Vimos como a formulação de Friedmann, por seu convencionalismo, não avançava nessa questão. A descrição do mundo deveria vir a reboque da orquestração preliminar da ordem temporal do mundo, como se anunciasse uma crise. Costuma-se argumentar que uma das consequências mais notáveis da revolução conceitual realizada em torno da teoria da relatividade especial foi a eliminação do tempo absoluto. A evolução da cosmologia, a partir da solução de Friedmann, trouxe a possibilidade de uma análise complementar, pelo exame da questão que ela permitia fazer: seria esta ciência, a cosmologia, o lugar em que o tempo absoluto newtoniano adquire uma reinterpretação e recupera seu significado? Seria ela, ou melhor, seriam as geometrias associadas aos modelos cosmológicos o território natural onde aquele absoluto newtoniano voltaria a ser útil ou até mesmo verdadeiro?

A maior parte dos cosmólogos, ao responder sim a essa questão, se apressa a esclarecer que não considera a opção por um tempo absoluto como um problema, como se fosse um retrocesso, pois ele é entendido

como nada mais que isto: uma escolha conveniente, útil e que permite uma descrição dentro do antigo cânone pré-relativista de descrição do Universo.

Revolução dentro da revolução

Gödel executou um novo movimento crítico, uma mudança de paradigma que nem mesmo Einstein havia ousado fazer, e produziu uma verdadeira revolução dentro da revolução relativista, indo muito além do que a ciência convencional pode aceitar. Ele começou por argumentar que a representação que usava um tempo global podia ser conveniente, mas não devia ser alçada à condição de absoluta; e que, ao contrário, era preciso sair do território nebuloso do apriorismo.³ Cabia investigar se seu uso pode ser globalmente possível em qualquer solução das equações de RG-2. Mesmo que escolhêssemos localmente uma ordem temporal capaz de exibir — e para todos os observadores — uma distinção clara e operacional entre passado e futuro, mesmo que todos os observadores coincidissem na caracterização dessa ordem, Gödel se perguntava se era indispensável que a universalidade da ordenação fosse extrapolada para além das observações locais, isto é, entendida como global, típica do Universo, com todas as consequências que tal extrapolação induz. A resposta que deu era não! Enquanto não possuímos meios materiais para decidir, pela observação, todas as diferentes alternativas possíveis, compatíveis com as leis da física, devem ser consideradas, e a estrutura gaussiana de um tempo global — como qualquer outra escolha — deve ser entendida como provisória. Isso é o que Gödel nos ensina.

Pequena descrição do Universo de Gödel

A geometria do modelo de Gödel parte da hipótese de que as equações que descrevem o comportamento da gravitação no Universo são dadas por RG-2, contendo, como no caso do modelo de Einstein, uma fonte de matéria identificada a um fluido perfeito incoerente (isto é, sem interação entre suas partes), além da resposta global do Universo, consubstanciada na expressão da constante cosmológica Λ . O fluido não mostra dependência temporal, mas possui uma propriedade que o singulariza: está dotado de uma rotação local — isto é, em cada ponto do espaço em que a matéria inerte se apresenta existe um eixo de rotação em torno do qual a matéria gira. A rotação é local, não se trata de uma rotação global do Universo como um todo, posto que isso seria impossível de ser observado. A intensidade da rotação é determinada pela densidade de energia local do fluido. As equações RG-2 impõem uma relação direta entre o valor da rotação e o valor da constante Λ .

O eixo de rotação local permite associar naturalmente uma direção privilegiada em cada ponto, de modo a definir um sistema de coordenadas cilíndricas. Podemos então descrever, nesse sistema de coordenadas, a situação especial da geometria.

Gödel mostrou, analisando o comportamento de uma classe de observadores, que eles poderiam girar em torno do eixo realizando uma trajetória fechada sobre si mesma. O ponto crucial, e que produz toda a estranheza do modelo, consiste na propriedade segundo a qual a trajetória fechada ocorre na estrutura completa espaço-tempo, isto é, trata-se de uma curva na qual um viajante que por ela caminhasse poderia passar mais de uma vez pelo mesmo ponto. Nessa trajetória, ele poderia realizar a experiência que chamaríamos de "volta ao passado"

Observadores gaussianos no Universo de Gödel

Para mostrar que, também no modelo de Gödel, é possível produzir, para uma classe de observadores especiais, um tempo único, que funcionaria para os observadores como um tempo cósmico, podemos proceder como o matemático Gauss ensinou e produziu de modo prático esse tempo global. Talvez fosse conveniente nos dedicarmos um pouco à questão, para que ela e outras que lhe estão associadas sejam mais claramente compreendidas.

Na escolha de um sistema gaussiano de coordenadas, na qual um tempo único e comum é estabelecido, devemos começar por construir a classe de observadores privilegiados que irão utilizar esse tempo. Como nenhuma força deve ser exercida sobre os observadores, pois eles são caracterizados como observadores livres, devemos começar por procurar o conjunto particular de observadores sem aceleração. Vimos que tal propriedade é típica de curvas geodésicas. Assim, o primeiro passo consiste em conhecer as curvas geodésicas na geometria de Gödel. Ademais, como queremos que as curvas sejam caminhos reais, pelos quais observadores reais possam se locomover, elas devem ser do tipo-tempo. Realizada essa etapa, escolhida uma classe de observadores especiais, definimos para eles um tempo único, pela sincronização de seus relógios. A partir dessa classe construímos uma estrutura espacial que nada mais é que uma mera imitação do que ocorre na geometria euclidiana, como estamos acostumados a fazer na geometria de Minkowski.

Então, para cada observador pode ser atribuído um tempo (que será o mesmo para todos os observadores dessa classe) e, perpendicularmente à curva especial no quadriespaço que caracteriza o movimento dos observadores gaussianos (as geodésicas), associa-se um correspondente espaço tridimensional, que chamamos simplifcadamente de "espaço". Dessa forma, se estabelece um sistema de coordenadas (tempo e espaço) capaz de caracterizar cada acontecimento do mundo.

O próximo passo é crucial, pois se trata de responder à questão: até onde podemos estender, a partir de um dado ponto qualquer P na geometria de Gödel, um sistema gaussiano de coordenadas? Pois é precisamente nesse momento que a geometria de Gödel se distancia de forma radical das demais conhecidas. Ao tentarmos realizar a extensão do sistema, uma análise matemática mostra que ele não pode ir além de um determinado ponto, que ele se interrompe em um dado lugar para além do qual ele torna-

se inaceitável como sistema de coordenadas regular. E qual é esse ponto ou conjunto de pontos além dos quais esse sistema gaussiano em Gödel não se pode estender? O que ocorre de especial ali, e de tal modo que, além desse ponto, se encontra um território para o qual o sistema gaussiano, gerado a partir de P , não é mais aplicável? E o que ocorre com esse sistema para que deixe de ser aplicável?

O que impede esse sistema de ser estendido além de um raio crítico — que chamaremos de $R(P)$, pois ele depende de cada observador e de cada ponto P em que a caracterização do sistema gaussiano foi estabelecido — é simples de descrever: ele se torna singular, isto é, não caracteriza as distâncias entre pontos desse Universo por números reais finitos. Tudo se passa como se chegássemos, em $R(P)$, a uma fronteira além da qual esse Universo não mais existiria: chegaríamos a uma barreira intransponível, às bordas que delimitariam esse Universo. Porém, não se trata de um impedimento verdadeiro, real, pois ele não passa de uma propriedade dessa particular classe de descrição do Universo de Gödel.

Outras caracterizações não gaussianas podem ir além do ponto crítico $R(P)$. Mas como isso é possível? O que acontece naquele ponto? Para melhor e mais facilmente entender isso, é conveniente fazer um pequeno intervalo nessa análise e examinar aqui uma situação semelhante, embora bem mais simples, que acontece em uma geometria mais elementar, a de Minkowski.

Geometria de Minkowski, observadores de Rindler

A escolha de um sistema de coordenadas — isto é, o modo pelo qual se representam os pontos ou eventos no espaço-tempo quadridimensional — é arbitrária. Em geral, alguns sistemas podem ser estendidos para todo o espaço-tempo, enquanto outros têm seu domínio de aplicação limitado a uma dada região. A escolha depende de várias motivações, entre as quais pode estar seu alcance. É possível pensar que a escolha normal seria aquela em que o sistema de coordenadas pudesse ser estendido sobre toda a variedade. Contudo, por diferentes razões, às vezes, é mais conveniente usar uma dada representação mesmo que ela não seja global, isto é, mesmo

que ela possua uma fronteira a partir da qual o sistema não seja mais utilizável.

Um exemplo bastante esclarecedor da situação na qual o sistema de representação usado é restrito a uma parte limitada da geometria é o sistema de coordenadas de Rindler. Sua origem está no fato — ditado por alguma conveniência local — de que se escolhe, para representar o espaço-tempo, uma classe particular de observadores privilegiados aos quais está associado um sistema de coordenadas: uma classe especial de observadores não inerciais. Assim, o sistema é selecionado por um critério associado a alguma propriedade de um conjunto de observadores.

No caso de Rindler, escolhem-se observadores não livres, aos quais uma força é aplicada continuamente, gerando uma aceleração constante. Assim, ao se estabelecer um sistema de coordenadas mais adaptado a esses observadores, descobre-se que ele só pode descrever um quarto da totalidade do espaço-tempo convencional de Minkowski (ver Figura 3).

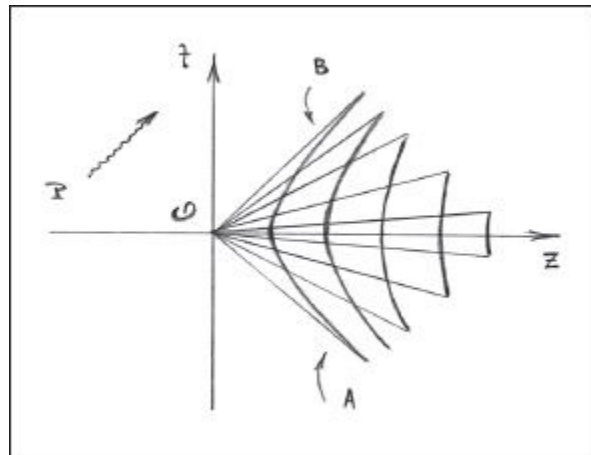


Figura 3

Sistema de coordenadas de Rindler. As linhas curvas representam os observadores acelerados de Rindler. As retas A e B definem as fronteiras desse sistema de coordenadas. Um fóton emitido em P jamais interceptará a região em questão.

Nesse caso, uma simples inspeção na figura e em sua interpretação mostra que as fronteiras que delimitam o domínio da validade do sistema de coordenadas de Rindler são determinadas pelo valor máximo da correspondente aceleração.

Geometria de Minkowski, observadores de Milne

Outro sistema especial de coordenadas foi caracterizado pelo astrônomo inglês Edward Milne. Na Figura 4 vemos que ele pode ser entendido como se constituísse uma espécie de sistema complementar ao de Rindler, embora sua origem seja totalmente distinta.

Com efeito, enquanto os observadores de Rindler formam sistemas acelerados, e, conseqüentemente, não possuem um tempo único gaussiano, a classe dos observadores de Milne constitui observadores inerciais, livres e que descrevem um só tempo global comum a todos eles. Isto é, como no de Gödel, esse sistema gaussiano é limitado.

Mas, então, de onde vem o horizonte, essa fronteira que independe do fato de que o sistema cubra todo o espaço-tempo? Para entendermos isso, devemos conhecer o modo pelo qual o sistema de Milne é gerado, como se descreve sua criação, como ele pode ser construído.

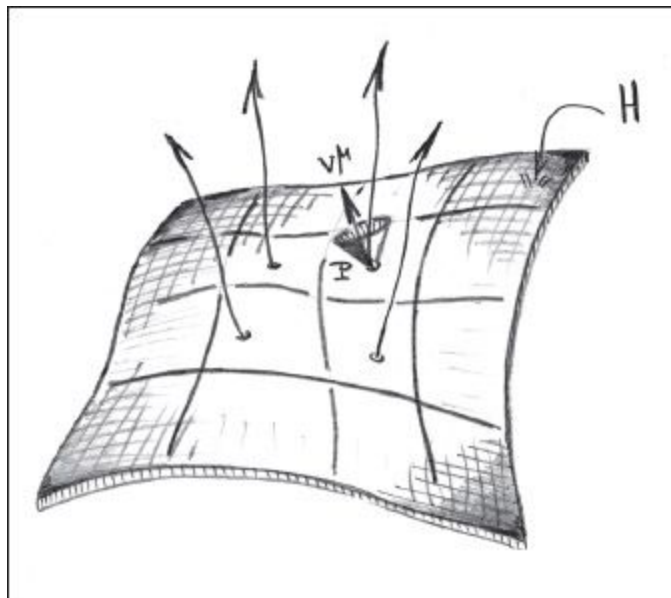


Figura 4

Representação gaussiana local. A hipersuperfície H, ortogonal ao campo de observadores (linhas com setas), pode ser sempre construída localmente. O objeto V^μ ilustra um observador no ponto P.

Com efeito, o sistema de Milne é gerado a partir de um momento arbitrário de criação artificial e formal do espaço-tempo minkowskiano.

Tudo se passa, para esse sistema de coordenadas, como se, a partir de um dado momento previamente selecionado e arbitrário, caracterizado por um valor que convencionamos chamar de tempo zero, uma quantidade infinita de observadores inerciais fosse hipoteticamente enviada para todas direções a partir de um ponto central do espaço, escolhido para constituir a origem espacial do sistema de coordenadas. Assim, a partir desse centro, todo o espaço seria atingido.

Entretanto, como os observadores só podem se movimentar para o futuro, o passado desse ponto e, conseqüentemente, todos os pontos que estariam no espaço associado a um tempo anterior ao escolhido no sistema de Milne como seu tempo inicial não poderiam ser atingidos pelos observadores de Milne. Por conseguinte, eles representariam eventos, acontecimentos do passado que estariam fora dessa descrição.

Entende-se, assim, a razão pela qual o sistema de coordenadas de Milne só é capaz de descrever uma parte da totalidade da geometria de Minkowski: trata-se de uma consequência direta do modo de formação do sistema. Os observadores de Milne, ao começarem sua descrição do Universo, postulam que toda a história passada está definitivamente apagada para eles, ou, para usar a palavra correta associada a essa definição, o passado anterior à sua entrada no mundo não existiu, não pode fazer parte de sua representação do Universo. E, no entanto, trata-se de descrever o bem-comportado espaço-tempo de Minkowski. Sabemos que é possível, escolhendo outra classe de observadores fundamentais, estabelecer um sistema gaussiano completo, capaz de representar toda essa geometria. Isso nos mostra claramente que a limitação do sistema gaussiano de Milne não é uma propriedade inerente ao espaço-tempo que ele descreve, mas uma limitação do alcance dessa particular escolha de representação.

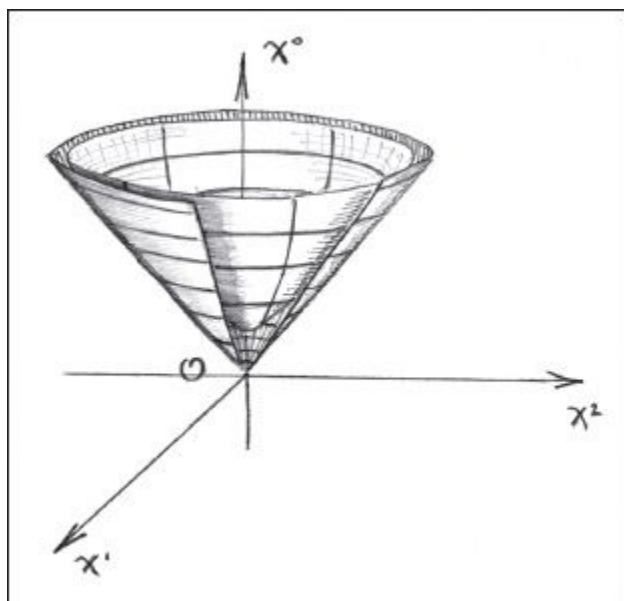


Figura 5

Observadores de Milne. Um corte no cone de luz exibe uma superfície (em formato de cuia) com a mesma coordenada temporal do sistema gaussiano de Milne. Essa superfície se aproxima assintoticamente às trajetórias da luz emitidas em O .

Sistema gaussiano na geometria de Gödel

Depois desse pequeno desvio para entendermos como se estrutura, em geral, um sistema de observadores gaussianos — e como se pode limitar e estender sua descrição —, voltemos ao caso que aqui nos interessa. Vamos proceder de modo semelhante. Suponhamos que, na geometria de Gödel, um conjunto de observadores geodésicos seja enviado para todas as direções a partir de um ponto qualquer O . Cada um desses observadores irá descobrir que, ao se aproximar de um certo valor de distância D de seu ponto original (valor que depende somente da intensidade de rotação existente nesse modelo), aparece uma barreira impossibilitando a extensão do sistema além de D . Qual a razão para o aparecimento da barreira? Qual a origem dessa curiosa propriedade de confinamento? Por que esse sistema limita ao raio D a possibilidade de construção de tempo único, do tempo gaussiano nessa geometria?

Um exame mais detalhado mostra o que se passa na fronteira: além de D , é possível o aparecimento de curvas do tipo-tempo fechadas. Isto é, um

observador real poderia, em princípio, voltar a seu passado, e, por conseguinte, esse sistema de coordenadas gaussiano se torna impossível de ser estendido além de D .

Notemos, entretanto, que a situação aqui, na geometria de Gödel, é diferente do caso anterior, de Minkowski. Tanto na representação de Milne quanto na de Rindler, a limitação de que tratamos é artificial, está associada a uma escolha especial de observadores. Podemos passar para outra categoria de observadores — os inerciais, por exemplo —, que podem realizar a tarefa de descrever a totalidade desse Universo de Minkowski. A diferença entre a limitação de alguns observadores gaussianos dessa geometria e aquela, bem mais dramática, existente na geometria de Gödel reside precisamente nessa característica que devemos repetir e enfatizar: enquanto em Minkowski trata-se de uma escolha de observadores que não podem utilizar um tempo cósmico global, único, para toda a geometria, no caso de Gödel, trata-se de uma proibição que independe de qualquer escolha especial de observadores.

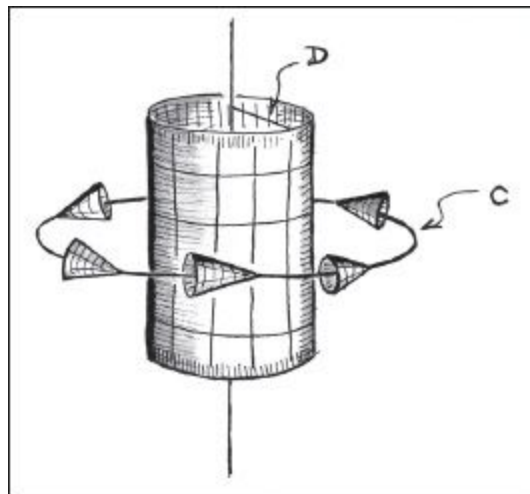


Figura 6

Sistema gaussiano na geometria de Gödel. A superfície cilíndrica com raio D representa o domínio de validade do sistema. Além dessa fronteira, é possível o aparecimento de curvas do tipo-tempo fechadas, como a curva C .

Uma breve comparação dos modelos de Universo de Einstein e Gödel

No modelo de Universo de Einstein não há dinâmica, o Universo é estático. Isso é afirmado ao começo de sua caracterização e pode ser feito porque existe um tempo global de referência com o qual os observadores fundamentais gaussianos podem comparar as diferentes propriedades dessa geometria. Nada semelhante em Gödel. Não somente a dinâmica aqui não existe, mas tampouco aquele tempo global de referência em relação ao qual nos questionamos a respeito dessa dinâmica. Além do mais, torna-se extremamente difícil — e, em certas situações, até impossível — examinar propriedades convencionais da física nessa geometria. Vamos dar um exemplo simples, mas esclarecedor.

Como vimos, a geometria de Einstein admite a construção de um sistema gaussiano no qual o Universo pode ser separado em uma estrutura tridimensional chamada "espaço" e um tempo. Essa construção é global, isto é, pode ser estendida sobre todo o Universo. Dessa forma, é possível organizar uma ciência convencional, semelhante à construída na relatividade especial, que guardaria muitas — se não todas — características com as quais se descreve o mundo. Em particular, por exemplo, seria possível traduzir uma física dos campos, da geometria de Minkowski para a de Einstein.

Nada semelhante poderia ser feito na geometria de Gödel. Com efeito, embora seja possível instituir um sistema gaussiano local nessa geometria, o fato de que ele não possa ser estendido globalmente produz resultados estranhos e inesperados. só para dar um exemplo, mencionemos as dificuldades quase insuperáveis de produzir uma física convencional de campos nessa geometria. Isso significa, de um modo simbólico e preciso, a impossibilidade de que um corpo material, uma partícula, seja descrito como uma estrutura única e permanente. Uma partícula vista por um observador nessa geometria poderia não ser reconhecida como tal por outro observador.⁴

¹ A ausência de tal tempo gaussiano global levou alguns autores a argumentar que a geometria de Gödel não deveria ser sequer considerada um modelo cosmológico.

² A eliminação do tempo seria, na visão de alguns, como o físico J.M. Salim, a única possibilidade de a cosmologia não se envolver em paradoxos, em questões circulares, sem solução.

³ É o mesmo procedimento adotado por Einstein ao empreender sua crítica ao apriorismo da física newtoniana.

⁴ Ver Mário Novello, *Máquina do tempo*, op.cit.

10. Do vazio com Lambda ao vazio sem Lambda

O vazio

Nas últimas décadas, a cosmologia produziu vários modos de apresentar diferentes respostas à inesperada questão: por que existe algo em vez do nada? A pergunta, devemos reconhecer, não passa de um modo alternativo de indagar sobre as origens do Universo. Empreendeu-se uma cosmogonia de substância, e mesmo de espaço-tempo, tanto em seus aspectos clássicos como quânticos. Na primeira, a não linearidade das equações da relatividade geral permite a existência de campos gravitacionais sem fonte, isto é, a partir de um processo de autoexcitação. O exemplo mais conhecido consiste no chamado Universo de Kasner. A partir da curvatura não nula do espaço-tempo que descreve esse Universo, pode-se estimular a produção de diferentes formas de matéria. Nesse caso, a geometria do Universo, resultado de um processo gravitacional autogerado, não pode ser entendida como um campo de interação entre corpos materiais, pois a matéria, nessa configuração primordial idealizada, não existe.

No segundo caso, isto é, nos aspectos quânticos, o estado fundamental dos campos de matéria — como, por exemplo, o vácuo quântico — sofreria excitação da curvatura da geometria, produzindo estados de matéria real a partir de estados de flutuação virtuais. Não é meu propósito neste livro entrar por esse caminho técnico. Mas gostaria de sublinhar que se entra aqui em um território do qual os defensores do papel limitado da cosmologia e de sua identificação com a astrofísica extragalática, superficial mas solidamente ancorada nos métodos tradicionais, gostariam de se esquivar. Isso se deve, entre outras razões, ao fato de que, ao fazermos essa análise, nos aproximamos inevitavelmente de saberes antigos, que possuem outras formas de argumentar e não utilizam o método científico. Por exemplo, no curso introdutório à metafísica,¹ Martin Heidegger, já na primeira aula,

inicia formulando aquela que deveria ser pensada como a questão fundamental da filosofia: "Por que há o ser em vez do nada?"

Essa interrogação, assim identificada como pertinente à metafísica, pode ser transformada em uma questão dos cientistas? Pode ela ser desviada do caminho pelo qual tem sido tradicionalmente entendida ao longo da história, subordinando-se ao tratamento que lhe tem sido destinado pelos filósofos, e adquirir uma conotação diferente, científica, quando lhe é atribuído um novo significado? E, se isso for possível, podemos ir além e gerar uma resposta aceitável no contexto da ciência contemporânea?

E, se assim for, se pudermos realmente tratar de maneira eficaz, no interior da ciência, essa questão fundamental, não teria sido tal possibilidade adquirida precisamente porque a estamos considerando com olhos imensos, globais — que a tudo perscrutam e invadem —, o olhar todo-poderoso da cosmologia? Seria possível abordar essa questão em um contexto menor, fora da cena cosmológica? Poderíamos, fora da cosmologia, usando uma ferramenta formal menor, que considerasse somente partes do Universo, abstraindo seus aspectos globais, produzir uma resposta convincente, internamente coerente, produzir sentido para essa pergunta?

Reconhecemos aqui, uma vez mais, a especificidade que distingue a cosmologia quanto ao tratamento de questões e respostas que a física nunca pôde explorar. Porque em seu interior, no seu plano de análise e formulação de questões, a cosmologia pode efetivamente gerar um novo significado para essa indagação e indicar o caminho capaz de conduzir a respostas consistentes. Para entendermos, mesmo que superficialmente, algumas dessas tentativas, realizadas no interior dessa ciência, de análise da questão fundamental, vamos fazer um breve resumo de algumas propostas de descrição da criação do Universo a partir do estado múltiplo que chamamos de Vazio.

Cosmologia segundo Kasner

Para exibir algumas das estranhas situações, afastadas do cotidiano, que aparecem na presença de campos gravitacionais intensos, bem como das dificuldades em conciliar a relatividade geral com conceitos tradicionais de vazio, vamos considerar um curioso exemplo de solução das equações dessa teoria, descrevendo um Universo em expansão com propriedades muito especiais descoberto pelo matemático norte-americano Edward Kasner.

Uma das características menos atraentes das equações da teoria da relatividade geral é que elas admitem soluções de difícil interpretação física. Ou, algumas vezes, até mesmo sem interpretação física aceitável. Para alguns cientistas, a geometria de Gödel, por exemplo, se inclui nesse caso. Outra é a geometria descoberta por Kasner. Se perguntarmos qual a fonte dessa geometria, a resposta é inesperada, pois não se trata de forma alguma de matéria ou energia. Nem mesmo estamos em presença da constante cosmológica, isto é, essa geometria é uma solução exata da relatividade geral sem fonte! Essa solução é permitida graças, precisamente, à não linearidade dessa teoria. Antes de entrarmos na análise, vamos enumerar as principais características da geometria de Kasner:

- é uma solução exata das equações da RG-1, sem fonte;
- possui um tempo global, único, cósmico;
- possui uma evolução temporal, isto é, o volume do espaço tridimensional varia com o tempo cósmico;
- tem uma singularidade inicial, do tipo análogo à que existe no modelo de Friedmann;
- é espacialmente homogênea, mas anisotrópica, isto é, sua expansão não se dá homogeneamente segundo direções arbitrárias do espaço.

Durante muito tempo essa geometria ficou relegada a um plano secundário pelos cosmólogos, posto que ela não parecia representar alguma

época da história do Universo, desde que foi aceito o cenário padrão espacialmente homogêneo e isotrópico. Essa situação de desinteresse foi interrompida quando, nos anos 1960, apareceu o trabalho do cientista russo Evgeni Lifshitz e seus colaboradores Vladimir Belinski e Isaac Khalatnikov, que deram um significado muito especial a essa geometria, retirando-a de posição secundária para colocá-la como uma das mais importantes geometrias no contexto cosmológico, quase tão importante quanto a de Friedmann. Sua propriedade de possuir direções preferenciais de expansão e contração atraiu a atenção dos que pensavam que a alta dose de simetria do Universo deveria ser entendida como um processo evolutivo. Uma das dificuldades do cenário padrão baseado no Universo de Friedmann está relacionada com a aceitação apriorística de sua homogeneidade e isotropia espacial. Assim, se existisse um modelo com menos simetrias, e que, por razões a serem ulteriormente explicitadas —depois de um limite temporal bem definido —, se comportasse como a geometria de Friedmann, seria dado um grande passo no entendimento dos mecanismos de evolução do Universo. É desse trabalho que vamos tratar agora

Belinsky, Khalatnikov e Lifshitz

A grande novidade do programa de análise empreendido por Lifshitz, Belinsky e Khalatnikov (BKL) foi imaginar que a observação de que o estado atual da geometria global seja descrito pela geometria de Kasner não a desqualifica como um bom modelo da história do Universo. Em outras palavras, BKL foram levados a examinar se poderia ter havido alguma época em que — por razões a serem ulteriormente precisadas — o campo gravitacional estaria desacoplado da matéria eventualmente existente no mundo. Isso à primeira vista parece absurdo, mas BKL deram um sentido sutil a essa indagação. Eles afirmavam a possibilidade de uma situação especial, na qual, embora a matéria ou energia sob qualquer forma (como o requer a relatividade geral) influencie o campo gravitacional e atue sobre a curvatura do espaço-tempo, essa ação pudesse ser desprezada, pudesse ser insignificante em face de outro fator maior de produção de curvatura.

Ora, o que existe além de matéria e energia? A própria geometria! Assim, em vez de considerarmos o vazio completo — sem matéria, sem energia e a geometria idealizada de Minkowski —, podemos levar em conta a geometria do espaço-tempo curva, isenta de matéria e energia, autossustentada pelo campo gravitacional. Ao pensarmos na solução de Kasner, encontramos uma pista para conciliar a proposta de BKL com a teoria da gravitação. A conciliação aparece sob forma de uma questão: poderia existir alguma região do espaço-tempo onde a ação da matéria-energia sobre a curvatura de sua geometria fosse bastante menor que a ação da própria curvatura sobre ela mesma? Em que o efeito não linear da curvatura sobre si mesma fosse mais importante que o efeito externo de qualquer matéria-energia existente sobre o campo gravitacional? Essa situação poderia levar a desprezarmos, na região onde isso ocorresse, a ação da matéria sobre os efeitos globais da gravitação. E poderíamos pensar na possibilidade de essa fase ser descrita, como uma boa aproximação, pela solução vazia de Kasner.

BKL passaram então a examinar se em nosso Universo, no modelo padrão da cosmologia, na geometria espacialmente homogênea e isotrópica

de Friedmann, gerada por um fluido perfeito, também homogêneo, haveria algum lugar, em alguma época de sua história, em que tal situação poderia ocorrer. À primeira vista isso parecia impossível. Como existiria um lugar no espaço-tempo onde essa simetria da geometria de Friedmann deveria ser substituída por uma estrutura menos regular, como a geometria de Kasner, em que a variação temporal das medidas de comprimento dependesse da direção pela qual fosse observada? Mais grave do que isso: onde essa violação poderia ser observada? Por onde ela se infiltraria? E como, dessa estranha assimetria, apareceria ou reapareceria, em momento ulterior, essa geometria que observamos hoje, a geometria cheia de simetrias, espacialmente isotrópica como a geometria de Friedmann? E qual seria esse lugar estranho em que, aparentemente, se violariam as simetrias espaciais desse modelo? BKL foram encontrar respostas a essas questões no único lugar no espaço e no tempo em que a geometria de Friedmann se destaca: próximo à sua singularidade inicial.

O programa de trabalho que se deveria impor ficou então claro: mostrar que a simetria das direções espaciais, a isotropia, é consequência de um enorme número de distintas fases do tipo descrito na geometria de Kasner, repetindo ciclos em todas as direções e de um modo aleatório. Dessa repetição alternada de fases, dessa sequência de estruturas desordenadas, contendo direções de expansão e contração privilegiadas, deveria surgir a ordem — isto é, a homogeneidade isotrópica. Infelizmente, esse programa ainda não foi totalmente realizado, e não se sabe se ele é factível, isto é, se a natureza, em um tempo finito, poderia tê-lo empreendido. Ou se ela poderia ter empregado esse mecanismo usando para isso um tempo infinito.

A geometria de Kasner

O cenário cosmológico de Kasner envolve a noção de vazio. O modelo se adapta inteiramente ao Programa Cosmológico de Einstein, assumindo *a priori* um tempo único, global, descrevendo o mundo como um Universo folheado, como um doce mil-folhas, recortado por espaços tridimensionais a cada tempo. Kasner decidiu procurar uma solução do vazio (de matéria e energia) que seja autogravitante, isto é, sem que exista uma fonte material da gravitação responsável pela curvatura do espaço-tempo.

Em um segundo momento, Kasner exigiu que a solução tivesse a propriedade de ser espacialmente homogênea, isto é, que as propriedades de qualquer ponto do espaço associado a um dado tempo cósmico — qualquer que seja este — fossem as mesmas. Ao contrário do Universo estático de Einstein — altamente instável, graças a seu caráter estático —, exigiu que as quantidades métricas de sua solução variassem com o tempo, preservando a homogeneidade espacial. Desse modo, as propriedades do modelo de Kasner variam com o tempo, mas, para cada tempo, elas são as mesmas: é isso que devemos entender quando se fala da qualidade de ser espacialmente homogêneo.

Finalmente, como novidade inesperada, Kasner abandonou a visão isotrópica de Einstein e se afastou igualmente do cenário de Friedmann, permitindo que seu modelo possuísse anisotropia espacial: ao observarmos diferentes direções do espaço, as correspondentes propriedades da geometria deveriam ser distintas. No modelo simétrico de Friedmann, há uma variação homogênea do espaço, cada direção em que fizemos uma medida possui as mesmas propriedades que qualquer outra. Isso em tudo difere das condições do Universo de Kasner. Por uma razão interna à estrutura das equações de Einstein associadas às simetrias espaciais quebradas de seu modelo, Kasner mostrou que tudo se passa em seu Universo como se, ao erigirmos uma tríade de orientação do espaço, dois de seus eixos sofressem uma expansão, enquanto o terceiro mostrasse uma contração. Naquelas duas direções, as unidades de comprimento, as régua constituídas por qualquer substância material, se dilatariam, enquanto na terceira direção ele sofreria uma contração.

Qual a origem desse curioso comportamento? O que induz a geometria desse Universo de Kasner, essa distinção direcional do espaço? Por que o Universo vazio, sem matéria de qualquer forma, sem uma fonte para sua geometria, pode exibir tal propriedade? Onde encontrar a causa dessa ausência de simetria direcional do espaço? As equações da Relatividade Geral são não lineares, já tecemos diversos comentários a esse respeito, mas devemos acrescentar mais um: a não linearidade permite a produção do Universo de Kasner do nada, a partir de uma singularidade inicial que não deve sua existência à matéria, mas constitui uma singularidade puramente geométrica, uma espécie de big-bang sem fonte. Um tipo semelhante de

singularidade que dá origem ao Universo de Friedmann também acontece aqui, está também na origem do Universo de Kasner. Essas singularidades têm, ambas, a mesma função: constituem momentos a partir dos quais tudo-que-existe — isto é, matéria e geometria curva, no caso de Friedmann, e geometria, no caso de Kasner — é projetado na realidade.

Surge então a pergunta: na origem desse Universo, na singularidade inicial que contém em potência um mundo, haveria alguma forma virtual de caracterização do mundo que viria a ser criado? E, se é assim, onde e como essa informação estaria contida? Sob que forma a geometria e/ou a matéria ainda inexistente, em um estado sem espaço nem tempo, latente, em sua singularidade que tudo esconderia, distinguiria um do outro? Como estaria ali explicitada essa informação? Como gerar um Universo de Friedmann ou um Universo de Kasner a partir de um ponto singular que não pode ser caracterizado pelo Universo-que-virá-a-produzir, pelo Universo-que-virá-a-ser? Sob que forma de conteúdo informativo inacessível a nós, futuros habitantes de um desses Universos, estaria o Universo-que-irá-existir sendo fabricado, produzido, separado, individualizado com relação aos outros? Como isso é possível, se a singularidade comum não pode guardar informação, não pode ser distinguida fisicamente? Como entender isso se a singularidade é classificada, nomeada, entendida como somente isto: uma divergência do espaço-tempo do qual não se pode extrair informação e, conseqüentemente, tornando inesperado, inaceitável mesmo, atribuir-lhe alguma espécie de reservatório informativo, alguma espécie de qualificativo que pudéssemos lhe atribuir e que permitiria então lhe dar um segundo nome e chamá-la, distinguindo-a assim, de *singularidade-de-Friedmann* ou *singularidade-de-Kasner*? Que qualidades seriam essas, senão virtuais? E deveríamos então fazer dessas virtualidades clássicas — isto é, que não podem ser associadas ao virtual quântico, mais aceitável posto que inerente — um tema de análise? Deveríamos então abdicar de construir hipóteses não observáveis sobre as soluções específicas, esses Universos singulares e particulares, essas espécies individualizadas de mundos que a relatividade geral permite, aceita, produz, inventa? Ou deveríamos simplesmente adotar a postura pragmática de entender esses Universos como simples estruturas matemáticas, nas quais a realidade de um seria a condição de rejeição de todos os demais?

¹ Martin Heidegger, *Introduction à la métaphysique*. Esse curso se refere ao semestre de verão de 1935, Universidade de Freiburg-en-Bisgar.

11. Modos de criação do Universo

Este mundo, o mesmo para todos, nenhum deus nem nenhum homem o criou, mas ele sempre foi, é e será.¹

Modos de criação

Que significado dar à expressão "modos de criação"? Sabemos que a possibilidade de descrição racional completa do mundo não é compatível com a existência de um momento singular (o chamado big-bang), posto que todo processo físico ulterior deveria depender de quantidades impossíveis de serem definidas na singularidade.

Assim, para contornar a dificuldade e produzir uma visão racional completa do mundo, duas atitudes foram adotadas:

- o exame da possibilidade de existência de uma fase colapsante anterior;
- novidades na descrição do Universo em sua fase extremamente condensada, graças à existência de processos de natureza quântica.

Não cabe detalhar aqui as sofisticadas questões técnicas que a descrição completa dos dois esquemas requerem. Entretanto, deve-se observar que, em ambas as propostas, os diversos cenários criados possuem um ponto em comum que pode ser simplificadamente descrito como a existência de um "estado" anterior ao momento de máxima concentração, representado classicamente por uma fase colapsante primordial que teria antecedido a fase atual expansionista. Em particular, a versão quântica permite produzir uma descrição na qual a própria ideia de espaço-tempo deveria ser deduzida de estruturas mais elementares, isto é, os fenômenos que iniciariam a expansão do Universo seriam descritos por estruturas não representáveis no espaço-tempo.

Universo eterno ou big-bang?

Ao final dos anos 1990, os cosmólogos retomaram, de modo sistemático, o exame daquela que é talvez a questão mais fundamental da ciência: a criação do Universo. Várias propostas alternativas têm sido desde então desenvolvidas, gerando modelos construídos a partir de leis físicas conhecidas — isto é, sem fazer apelo a modificações não controladas do comportamento da matéria e da energia. Essa atitude por parte dos cientistas não deve provocar espanto algum, posto que ela não é novidade e permanece como uma tradição natural de explicação racional completa do mundo.² De um modo geral, a ideia de um início singular, explosivo, do Universo, que determinaria os limites nos quais a investigação científica deveria ser interrompida, parece ser hoje menos atraente que outras propostas. A ideia de aceitar condições iniciais inacessíveis foi posta de lado.

O termo big-bang para caracterizar a suposta explosão inicial possui duas distintas conotações, dependendo de sua utilização, com ou sem rigor científico. No sentido técnico, ele significa um Universo muito condensado em que novas leis físicas poderiam ocorrer. Por outro lado, em seu significado mais popular, identificaria o começo do mundo, uma região para sempre inacessível. É nesse segundo caso que o limite de racionalidade do mundo se aplicaria.

Não iremos aqui produzir um inventário das diferentes propostas recentemente apresentadas de geração do Universo. Concentraremos nosso interesse em duas versões que são exemplos bem característicos das correntes rivais mais relevantes — uma, de natureza clássica, outra, de natureza quântica. Não deixa de ser curioso observar que tanto uma quanto outra fazem referência a um certo estado primordial denominado "Vazio" ou "Nada". É bem verdade, também, que esse estado possui significados distintos para os diversos modelos. Ambos, no entanto, partilham uma propriedade comum: eles se referem ao estado fundamental como algo que se aproxima bastante do conceito intuitivo tradicional de vazio — isto é, a ausência de matéria e energia sob qualquer forma, inclusive a gravitacional.

Assim, nos dedicaremos a comentar essas propostas capazes de descrever possíveis mecanismos de criação do Universo.

- Proposta quântica: baseada na existência de uma era primordial controlada por processos de natureza quântica.
- Proposta clássica: baseada em modificações na estrutura da geometria do espaço-tempo ao longo da sua história, o cenário wist.

Criação espontânea: Universo quântico

Na teoria da gravitação, costuma-se considerar um comprimento L_p — o comprimento de Planck — como um valor fundamental capaz de caracterizar o limiar de separação entre seus domínios clássico e quântico. O valor efetivo desse comprimento é construído, por meio de uma análise dimensional simples, a partir dos valores das constantes fundamentais da física moderna:

- a característica quântica dada pela constante de Planck h ;
- a contribuição da teoria da relatividade representada pela velocidade da luz denotada pela letra c ;
- a própria constante newtoniana da gravitação G .

Obtemos, assim, $L_p = h g / c^3$, cujo valor é dado por $L_p = 10^{-33}cm$, aproximadamente. A possibilidade de construção dessa quantidade é, em geral, relacionada à ausência da simetria conforme dos processos gravitacionais, isto é, à não invariância dessa interação por transformações de escala dependentes de posição no espaço-tempo. Tal alteração no valor padrão de réguas e relógios é conhecida sob o nome de transformação conforme e desempenha um importante papel em vários setores da física. Assim, para comprimentos tão pequenos, 10^{22} vezes menores que o alcance da interação nuclear, flutuações de natureza quântica da geometria poderiam ser relevantes e até dominantes. Essa consideração levou alguns autores a argumentar que a própria ideia de um contínuo espaço-tempo não poderia mais ser aí empregada.

Infelizmente, a física quântica gravitacional não é (ainda?) uma ciência experimental. Não existe nenhuma observação direta ou indireta capaz de pôr à prova — como requer a boa tradição científica — as consequências da hipótese quântica da gravitação. Assim, penetra-se um nebuloso território onde, para descrever a quantização da gravitação, não temos a observação como o critério tradicional para limitar as diferentes possibilidades teóricas.

Este comentário não pretende reduzir a importância formal dos processos de natureza quântica da gravitação, mas tem por objetivo simplesmente alertar o leitor para a verdadeira perspectiva com que devemos encarar as consequências formais da aplicação do procedimento de quantização.

Sabe-se, desde o final dos anos 1960, que efeitos quânticos podem alterar radicalmente o comportamento do campo gravitacional nas vizinhanças de uma eventual singularidade clássica. Alguns autores procuraram mostrar que, de todas as possíveis configurações quânticas do Universo denotadas pela letra grega Ψ , as mais prováveis seriam aquelas não singulares, isto é, que representam Universos eternos, sem um tempo finito de existência. Infelizmente, não se conseguiu até hoje qualquer demonstração dessa conjectura que independesse de condições especiais de contorno impostas a essa função. Desse modo, embora os efeitos quânticos alterem a questão da criação do Universo, eles não são capazes, em geral, de eliminar completamente uma inacessível singularidade, e, como no mundo estritamente clássico, pode ou não ocorrer uma origem tipo big-bang.

Podemos agora perguntar: qual a descrição para a origem do Universo que uma teoria quântica da gravitação nos oferece? De várias outras, iremos comentar somente uma proposta, conhecida sob um título intrigante: criação a partir do Nada ou flutuação do Vazio. O ponto de partida desse modelo é a equação quântica da gravitação, ou equação de Wheeler-de-Witt (WW), que desempenha, para essa interação, o papel atribuído à equação de Schrödinger no resto da física. Na equação WW, um complicado operador atua sobre o objeto matemático Ψ , interpretado *a posteriori* como a função de onda quântica do Universo.

A ideia de criação quântica do Universo consiste em partir de um estado fundamental Ψ , que descreve o vazio, onde não há nada, exceto "zero (*vacuum*) flutuação de todos os campos físicos, inclusive o gravitacional."³ Aí não haveria possibilidade sequer de considerar o contínuo espaço-tempo, posto que essa estrutura pertence ao território clássico (isto é, não quântico). Como resultado de flutuações de Ψ , aparece uma certa estrutura clássica (ulteriormente identificada como o espaço-tempo).

Um modelo mais restritivo, ou melhor, mais específico, pretende caracterizar já nessa estrutura nascente uma particular configuração, identificando-a com uma geometria do tipo de deSitter. Pode parecer

espantoso constatar que o espaço-tempo é gerado como uma estrutura regular já detalhada em suas propriedades, particularizando não somente um contínuo riemanniano como uma específica configuração tão cheia de simetrias quanto a geometria de deSitter. De um modo simplista, pode-se argumentar que a geometria de deSitter representa o vácuo cósmico, gerado pela completa ausência de matéria e energia, exceto por uma flutuação global identificada à constante Λ .

É preciso, ademais, levar em conta que a criação do Universo nesses modelos quânticos de flutuação do vácuo é considerada dentro do programa convencional da física, isto é, sem violação das leis observadas no nosso Universo. A última afirmação poderia parecer à primeira vista irrelevante, entretanto, é bom lembrar que vários autores têm argumentado sobre a possibilidade de transcendência daquela autolimitação, gerando configurações que contêm incontáveis modificações em suas leis internas.

Paralelamente a essa generalização — e para permitir alguma forma de autocontrole —, associaram-se certos princípios limitadores às múltiplas configurações. Um exemplo que adquiriu certo sucesso é o "princípio antrópico", criado com a função de singularizar nosso Universo em meio a uma coleção de possíveis mundos, e graças tão somente à nossa existência: uma tentativa de *aggiornamento* da visão ptolomaica do mundo. Não faremos comentários adicionais a essas tentativas, citando-as somente para alertar o leitor sobre os embaraços formais com que depara a cosmologia, bem como qualquer atividade conceitual que trata de totalidades.⁴

Geometrias do tipo de deSitter podem representar universos em colapso ou em expansão (ver Figura 7). É possível adotar aqui duas interpretações: ou o Universo tem uma história eterna, e a configuração clássica identificada com a geometria de deSitter sempre se autossustentou; ou, então, uma fase não clássica pode aparecer em uma região que identificaríamos como "próxima" ao ponto de máxima condensação.

No segundo caso, a descontinuidade entre uma estrutura colapsante anterior e uma estrutura expansiva apareceria como consequência de processos quânticos de tunelamento, através de região classicamente proibida, onde a estrutura espaço-tempo perderia seu significado.

Poderíamos mesmo dizer que ela estaria aí sendo fabricada, guardando a memória de um equivalente estado "anterior". As duas interpretações são possíveis e conduzem à mesma descrição: a existência de uma fase expansionista tipo deSitter para a geometria do Universo.

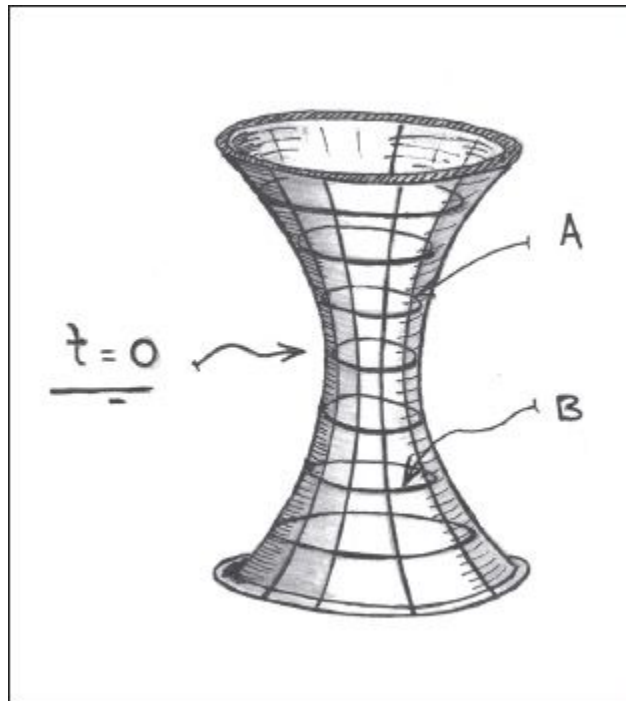


Figura 7

Universo de deSitter representado por um hiperboloide. As curvas do tipo A são geodésicas do tipo-tempo, e as curvas do tipo B (em formato de anéis) ilustram superfícies com a coordenada t constante. Para $t < 0$, o Universo se contrai, e para $t > 0$, se expande. Em $t = 0$, existe a aproximação máxima das curvas do tipo A.

Um Universo eterno, sem singularidade, criado espontaneamente a partir da instabilidade de um longínquo estado do vazio, tendo experimentado uma fase colapsante até atingir seu volume mínimo, e iniciado em seguida um processo de expansão que vivenciamos hoje: essa configuração do cosmo é compatível com o estado atual das observações astronômicas bem como com as teorias físicas existentes — sejam elas de natureza clássica ou quântica. É o Vazio, estado fundamental da matéria e energia sob qualquer forma, que constitui o "estofa primordial" com que se formam não somente o espaço e o tempo, mas a própria matéria, isto é, toda substância do mundo. Essa cosmogonia leva à afirmação de que existir pressupõe como

condição imprescindível a instabilidade do Vazio. Vamos ver como esse cenário eterno, em sua versão clássica, vem sendo igualmente elaborado pelos cosmólogos.

Cenários de Universo eterno

O Vazio

A noção de vazio permeia a física moderna. No mundo quântico, ele é um estado fundamental a partir do qual todos os demais estados fisicamente relevantes são definidos. Certamente não tem as propriedades que o mundo clássico lhe atribuía.

Se fôssemos procurar em outras atividades — na filosofia, por exemplo — o seu correspondente, encontraríamos praticamente em todos os grandes esquemas filosóficos um procedimento análogo, envolvendo a discussão sobre o ser, a existência de uma coisa, de qualquer coisa. Os físicos pretendem assumir um discurso diferente, menos abrangente, com toda a aparência exigida pelo rigor absoluto e independente dos processos observados. Assim, argumenta-se que o Vazio é um estado da matéria, dos correspondentes campos associados, possuindo particularidades como qualquer outro estado. Ademais, trata-se de algo observável, que pode ser medido. Isso realmente o identifica como um estado convencional. Entretanto, ele possui uma particularidade especial, por ser um estado fundamental a partir do qual todos os demais estados dos campos podem ser construídos.

Untitled Folder

Colapso e expansão

Devemos agora, para prosseguir nossa análise, perguntar: seria possível, graças a processos clássicos, conectar as fases colapsante e expansionista de um Universo friedmanniano eterno? Sim, dirá o cosmólogo. Com efeito, apresentou-se mais de um modelo capaz de descrever tal configuração nos últimos anos. Iremos examinar, a título de exemplo, somente uma dessas possibilidades, que tem por base a modificação da estrutura geométrica do espaço-tempo ao longo de sua história.⁵

Ao passar por uma fase extremamente condensada, tendo atingido o raio mínimo, o Universo sofreu mudanças globais em seu comportamento. Entre elas, a que nos interessa examinar é a possibilidade de ter havido uma modificação estrutural em sua geometria. Para compreendermos como essa alteração é possível, pelo menos em princípio, devemos entender uma questão delicada e que pode ser resumida da seguinte forma: se observações efetuadas em um dado momento e em uma determinada região do espaço indicam o tipo particular de estrutura geométrica do mundo, é permitido concluir que essa estrutura será preservada como tal ao longo da história do Universo? Dito de um modo mais técnico: se, em uma dada hipersuperfície tridimensional denotada por Σ_1 , a estrutura geométrica é do tipo riemanniano, o que podemos afirmar sobre a estrutura desse espaço-tempo em uma outra hipersuperfície Σ_2 , no futuro de Σ_1 ?

Para responder a essa pergunta é preciso nos situarmos no interior de um modelo capaz de descrever o comportamento do campo gravitacional ao longo de toda a história do Universo. Assim como ocorre com a matéria ordinária, que pode exibir transições de fase controladas pela temperatura (passagem de um estado líquido ao gasoso, por exemplo), ela também pode constituir o parâmetro controlador capaz de distinguir modificações estruturais da geometria. Quando o Universo se encontra extremamente condensado, nas vizinhanças de seu raio mínimo (o que, de acordo com a descrição friedmanniana típica, é sinônimo de temperatura muito elevada), uma transição de fase geométrica pode ocorrer. Quando essa transição é suave, e as alterações contínuas, é possível estabelecer uma descrição analítica do processo — associada a uma modificação efetiva da gravitação einsteiniana. Pode-se descrevê-lo como a passagem de uma configuração clássica riemanniana (quando o raio do Universo é suficiente grande, comparado com o raio mínimo) para uma estrutura descrita pela geometria de Weyl integrável, chamada wist.

Alarga-se assim o número de variáveis necessárias para descrever a gravitação. Como devemos tratar do Universo espacialmente homogêneo, além do raio $A(t)$, precisamos conhecer também uma outra função $\Omega(t)$ que controla o afastamento da estrutura riemanniana do espaço-tempo. Quando essa função for constante, a geometria é riemanniana. A estrutura wist só aparece naquelas regiões onde Ω não é constante. Nesse caso, a questão a

que nos referimos acima pode ser reinterpretada: se a função Ω é praticamente constante hoje, como pode ela ter variado ao longo do tempo cósmico? Uma resposta a essa questão aparece na Figura 8.

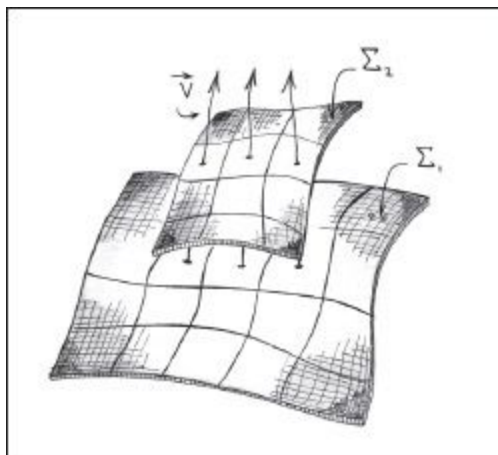


Figura 8A

Representação da evolução da geometria em wist. Na hipersuperfície Σ_1 , a geometria é riemanniana, uma vez que o campo Ω é praticamente constante. Já em Σ_2 , de menor "raio", o campo Ω teria uma grande variação temporal, caracterizando assim uma geometria de Weyl. As linhas com setas ilustram algumas trajetórias do campo de observadores.

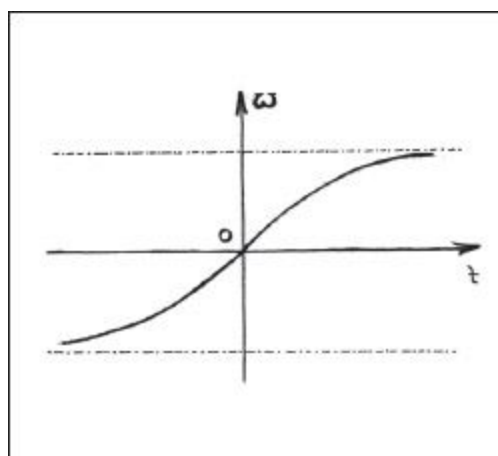


Figura 8B

Variação temporal da função Ω (representado no gráfico em letra minúscula) em wist.

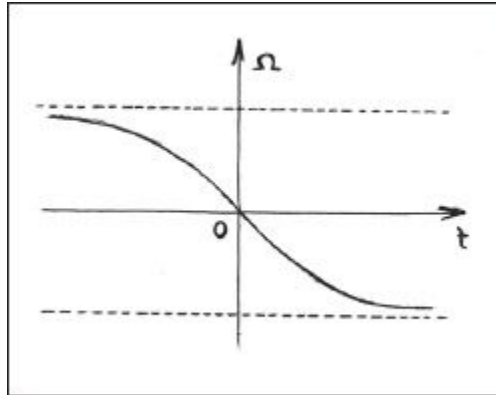


Figura 8C

Variação da função Ω no modelo de antiwist.

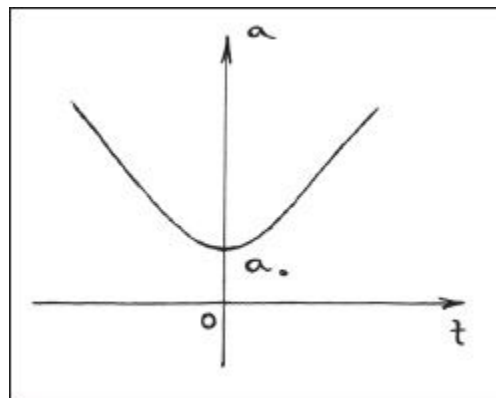


Figura 8D

Evolução do “raio do Universo” $a(t)$ em ambos os casos. Note que a configuração é eterna, sem começo nem fim.

Por questões técnicas, a figura que nos interessa particularmente é a 8-B, que controla sua variação temporal. A razão para isso é que o afastamento da geometria riemanniana é medido precisamente por essa variação. É importante notar que o raio $A(t)$ admite, graças a essa dependência funcional de $\Omega(t)$, a configuração eterna (isto é, não singular).

É possível, pictoricamente, representar a evolução desse Universo associando-o a um gás contido em uma caixa que dispõe de um pistão capaz de fazer variar o seu volume, passando por várias fases:

- fase 1: graças à instabilidade do vazio, pequenas perturbações (representadas simbolicamente por um pistão) crescem: um

Universo vazio começa a colapsar, o seu volume V decresce com lentidão.

- fase 2: quando o Universo atinge seu volume mínimo V_0 , a aceleração do pistão é máxima.
- fase 3: atingindo o volume mínimo V_0 , a força sobre o pistão inverte sua direção, o espaço-tempo começa sua fase de expansão, a princípio muito rapidamente e, com o passar do tempo mais lentamente.
- fase 4: o Universo continua sua lenta expansão.

Enquanto as fases 1 e 4 têm duração muito grande, as fases 2 e 3 ocorrem muito rápido. Tudo se passa como se o Universo, ao se aproximar da vizinhança do seu volume mínimo, sofresse um sobressalto, de curtíssima duração.

Definimos assim, por convenção, o ponto $t = 0$ como correspondente ao momento de máxima condensação ou raio mínimo. Vemos na Figura 8 que a função Ω se torna uma constante longe de $t = 0$. Da Figura 8-B conclui-se que a variação rápida de $\Omega(t)$ em torno da origem $t = 0$ sustenta a afirmação de que a estrutura wist se encontra limitada temporalmente a uma pequena fase da história do Universo, no seu ponto de máxima condensação. O campo Ω passeia pelo Universo, controlando sua geometria, como um pulso variável no tempo e de amplitude máxima centrada em torno da origem $t = 0$, determinando o instante de transição da fase colapsante à fase expansiva. Tudo se passa como se uma onda espacialmente homogênea preenchesse todo o Universo, caminhando do infinito temporal passado (riemanniano) para o infinito temporal futuro (riemanniano), espalhando-se nessas regiões assintóticas, tendo concentrada sua energia em torno do ponto $t = 0$. A esse pulso temporal, chamamos de "wiston". Ele induz e controla a variação estrutural da geometria, permitindo a passagem de uma configuração riemanniana a outra, através de uma ponte geométrica da forma Weyl integrável.

Curiosamente, além da solução wist descrita acima (ver figuras 8-A e 8-B) é possível construir uma outra solução, chamada antiwiston e que representa uma configuração temporalmente invertida (ver figura 8-C).

Aqui aparece uma particularidade notável desse modelo: como a energia dos wiston e antiwiston não depende de Ω , mas sim de seu quadrado, concluímos que ambas as configurações geram a mesma evolução temporal para o raio do Universo (ver figura 8-D).

Essa invariância sob a transformação de inversão temporal, em que se transforma cada momento de tempo t em seu oposto $-t$, teria profundas repercussões filosóficas sobre a direção temporal na qual a evolução ocorre, não fossem certas particularidades envolvendo o comportamento das flutuações dos vácuos dos diferentes campos físicos. Isso nos fará penetrar a questão da cosmogonia, a saber: qual a origem da matéria? No mesmo instante, devemos procurar responder à pergunta: é um Universo eterno instável?

A eternidade é instável?

Em primeiro lugar, é preciso procurar esclarecer um pouco melhor qual o significado da questão sobre a instabilidade do Universo interpretando-a à luz do que examinamos até agora. Um Universo tão simétrico quanto o de Friedmann pode ser considerado o ponto final de configurações anteriores, menos simétricas, que teriam dissipado suas irregularidades por algum processo físico, como no caso do Universo de Kasner e de suas anisotropias espaciais. Ou, então, o que é mais aceito, pode ter tido uma origem, num tempo finito ou infinito, sendo projetado diretamente nesse estado.

A análise dessa questão nos permite considerar o contexto em que devemos situar nossa pergunta. Sabemos que um Universo homogêneo e isotrópico pode sofrer perturbações, pequenas alterações em suas propriedades geométricas — possivelmente induzidas por flutuações materiais aleatórias, de diferentes características, não necessariamente preservando as simetrias exibidas na geometria original. Isso significa que, sobre a estrutura friedmanniana considerada como básica, pequenas perturbações podem ocorrer, induzindo desvios não somente em sua condição espacial homogênea, como também em sua isotropia. Se esses desvios crescessem fora de controle, isto é, se pequenas flutuações da geometria não tivessem limite, um Universo eterno certamente deixaria de ser homogêneo em algum momento ulterior.

A mesma análise se aplica às flutuações de entropia e de densidade da matéria. Se essas pudessem crescer sem controle, um Universo eterno conduziria ao paradoxo de conter uma quantidade infinita de matéria e de entropia — com as dificuldades óbvias de tratamento formal que daí decorreriam. Esta é, simplificarmente, talvez a maior dificuldade que se apresenta a todos os modelos que propõem um Universo não singular, eterno: como controlar suas perturbações, como inibi-las, ou melhor, como estabilizá-las? O cenário wist consegue resolver a questão de um modo particularmente simples e elegante.

Cosmogonia: a criação da matéria

No cenário wist, o estofo primordial do Universo é o espaço-tempo vazio, com uma geometria caracterizada por duas quantidades: uma estrutura física complexa (a métrica) através da qual se determina todo intervalo de espaço e de tempo, e o controlador das unidades fundamentais de medida, que chamamos de campo Ω . É com esses ingredientes que devemos criar as diferentes formas de matéria e energia.

Na gravitação efetiva, no modelo wist, o vazio minkowskiano é instável. Eventuais flutuações — que poderiam ser imputadas ao princípio de incerteza, ou a uma origem primordial (o Vazio e suas microperturbações projetariam no real a idealizada configuração minkowskiana) — crescem. São elas, pura geometria vazia de matéria e energia, que constituirão a fase inicial colapsante de uma configuração friedmanniana. Essa fase termina com o Universo atingindo seu raio mínimo. A partir daí, o Universo inicia um processo de expansão.

Tal estrutura seria completamente simétrica no tempo, descrevendo uma bolha vazia contraindo e inflando no nada, não fosse pelo comportamento desigual dos estados de vácuo dos diferentes campos físicos que descrevem a matéria nas fases de colapso e expansão. Em sua fase colapsante, a interação do wiston com o vácuo dos campos de matéria induz à supressão, à atenuação exponencial de qualquer flutuação. É precisamente essa propriedade que permite a estabilidade desse Universo eterno.

Embora desejável, a eficiência estabilizadora dessa fase — fosse ela válida ao longo de toda a história da fase expansiva subsequente — não permitiria criar forma alguma de matéria, e, conseqüentemente, o Universo vazio não descreveria nosso cosmo atual. Entretanto, e esta é a parte mais importante desse cenário, ao passar à fase expansiva, o comportamento da interação do vazio de matéria com o wiston se altera radicalmente, pois durante a expansão as flutuações da matéria crescem. A criação de substância é tão rápida aí, que logo a densidade de energia da matéria recém-criada passa a dominar a evolução do Universo. A matéria forma, a partir de então, o verdadeiro controlador da evolução da geometria do espaço-tempo, atingindo aí um comportamento típico do antigo padrão friedmanniano.

Como o processo ocorre na vizinhança do raio mínimo, isto é, quando as energias envolvidas são elevadas, a matéria criada se comporta como uma sopa quente de partículas sem massa. É possível então interpretar (tendo, porém, a atenção de não esquecer o verdadeiro significado geométrico desse processo) essa situação como o decaimento, a transformação do campo Ω , isto é, a transferência de sua energia para a matéria.

Quebra-se assim a prévia simetria colapso/expansão, produz-se entropia, e a direção temporal ganha um significado maior: a evolução cósmica, da qual induzimos o tempo cósmico, aponta na direção da evolução termodinâmica, os processos ocorrem na tentativa de aumento entrópico. Desta análise devemos reter que a matéria, qualquer forma de matéria, passa a existir graças à instabilidade do vácuo induzida pela sua interação com o controlador da geometria — o wiston "omega" — na fase expansiva do cosmo.

O vazio é absolutamente instável?

Já discutimos antes dois modelos — um quântico e outro clássico — de instabilidade do vazio. Em ambos os casos, nos limitamos a modelos específicos, nos quais o vazio é definido como um possível estado de uma série de configurações fisicamente realizáveis. Pode-se imaginar que uma descrição tão limitada não fosse a mais genérica descrição do vazio. Antes de esclarecermos a dúvida, gostaria de lembrar uma anedota que o cientista russo Yakov B. Zeldovich gostava de contar em uma tentativa popular de descrever o vácuo quântico.

Um jovem entra em uma lanchonete e pede um sorvete. O dono lhe pergunta: "Que cobertura o senhor deseja?" "Nenhuma, não quero cobertura, só o sorvete de baunilha", retruca o rapaz. "Sim", continua o dono, "entendo; mas que cobertura o senhor não quer que eu coloque em seu sorvete: o senhor não quer cobertura de *marshmallow* ou não quer cobertura de chocolate?"

A anedota exemplifica bem a questão da descrição do vácuo: ele só pode ser definido em relação a um certo espectro de estados possíveis, dos quais o vácuo é um particular caso. Não é possível definir o vazio absoluto

sem referência a possíveis estados físicos acessíveis. Isto é, ao tratar o vazio como um estado realizável, é preciso *a priori* introduzir uma ordem formal na qual outros estados fisicamente possíveis poderiam ser ocupados.

Disso decorre que a questão da instabilidade do vácuo só pode ser efetivamente examinada à luz de um dado modelo físico. Alguém poderia imaginar que a questão de sua estabilidade deveria admitir uma resposta absoluta se analisada em relação a todas as teorias acessíveis. Eu deixaria para o leitor a tarefa de examinar as dificuldades formais que tal definição contém. Acrescentaria aqui somente um comentário sobre a inevitabilidade, neste último caso, de se cair numa espécie de armadilha formal, típica de estruturas totalizantes, tal como evidenciada por Gödel em sua análise da impossibilidade de demonstrar a autocoerência de sistemas lógicos.

Universo eterno: clássico ou quântico?

Um dos legados da matematização da natureza consiste na aceitação de que, se dois processos físicos, de aparências distintas, são descritos pela mesma equação, então eles podem ser identificados. Essa identificação pode aparecer sob forma de equivalência estrutural ou até mesmo ir mais profundamente numa caracterização comum, única. O cenário eterno que apresentamos acima como parte da estrutura wist do mundo é descrito por uma equação de evolução do seu fator de escala $A(t)$, controlado pela estrutura geométrica Ω , como se essa fosse um campo de matéria composta por substância extremamente rígida, um fluido, cuja relação entre densidade de energia ρ e pressão p é dada pela expressão extremal ultrarelativística $p = \rho$. Entretanto, a mesma equação que controla o raio do Universo $A(t)$ pode descrever, numa aproximação semiclássica, o efeito de campos quantizados gerando o mesmo modelo cosmológico.

Concluimos então que tanto a criação clássica quanto a quântica podem ser interpretadas como produtoras de uma mesma realidade, este Universo, sob olhares distintos, mas equivalentes, de suas formulações teóricas. A identificação parece eliminar uma longa discussão sobre a questão da origem do mundo e apontar numa direção comum na qual tudo-que-existe — isto é, espaço, tempo, matéria e energia — se interpreta como flutuação do "vazio". Esse estado fundamental, prehe de um Universo, é o principal

foco de nossa atenção. É ele que devemos examinar meticulosamente, e é essa a tarefa que a cosmologia nos propõe.

¹ A demonstração dessa afirmação — ainda não completamente realizada — foi deixada, por Heráclito, para as gerações subsequentes.

² Compare com a visão de Dirac, que comentamos anteriormente.

³ Ver trabalho de Zeldovich e Vilenkin

⁴ Se apresento aqui essas dificuldades não é com o objetivo de exibir uma visão negativa, de desprestígio, da cosmologia junto às demais práticas científicas. Bem ao contrário, creio que ela tem o nobre mérito de explicitar, em sua prática, as dificuldades latentes em toda ciência, a racionalidade imposta ao mundo ou por ele exposta.

⁵ Há um número grande de propostas descrevendo um Universo que passa de uma fase colapsante à atual fase de expansão. Escolhi apresentar um cenário que se fundamenta na transformação da geometria ao longo do tempo não porque o considere mais realista que os demais, mas somente porque ele requer uma análise da dependência da geometria do Universo em relação ao processo de expansão – uma propriedade que a um só tempo se adapta à cosmologia de Dirac e coloca em relevo uma vez mais a questão cosmológica original de Einstein.

12. A irresistível atração para existir¹

Como vimos, o vazio quântico de que trata a cosmologia é instável. Isso significa que aquilo que chamamos de "estado de existência" é mais provável que o estado que identificamos com o nada e que chamamos de Vazio. Tal situação é sintetizada na frase: é difícil, é muito difícil, é quase impossível não existir.

Uma bolinha que colocamos em nossa mão em concha representa à perfeição a ideia intuitiva de estabilidade. Opostamente, a mesma bolinha colocada em um cálice invertido, em sua face convexa, representa a instabilidade. Entendemos esses conceitos, por razões corriqueiras de nosso cotidiano, quando perturbamos o estado de equilíbrio da bola. Uma pequena ação sobre abola, e ela volta ao mesmo lugar de equilíbrio anterior, no primeiro caso — da estabilidade —, ou afasta-se mais e mais daquele seu estado primitivo — a instabilidade —, no segundo. Dessa forma, podemos entender que a instabilidade do Vazio torna o título deste capítulo uma sentença compreensível, embora certamente provocativa, e não elimina de todo a estranheza que ele contém

Para compreender um pouco melhor o que essa sentença nos diz, vamos proceder por etapas, para interpretar a linguagem que os cientistas utilizam para apresentar um discurso sobre o mundo, interrompendo um pouco nossa análise para um pequeno comentário sobre uma questão que físicos e filósofos têm disputado ao longo dos séculos. Ela diz respeito aos significados que estes e aqueles associam à palavra existir. Não estou aqui interessado em contrapor umas às outras, mas em considerar a situação particular no que diz respeito à análise que fizemos sobre o vazio e em que a questão do significado da palavra existir aparece em primeiro lugar.²

Tentemos entender a sentença — e algumas de suas consequências — anunciada pelos cosmólogos, de que é possível afirmar, usando conceitos de que a ciência dispõe hoje, que é muito difícil não existir. Talvez o modo mais direto de darmos sentido convencional à ação do vazio consista em fazer uma analogia matemática, examinando o modo pelo qual é possível extrair informação a partir da análise do conjunto completo de soluções de uma dada equação da física.

Só foi possível explicitar isso quando a ciência penetrou os complexos processos não lineares, escondidos em variados fenômenos tratados em diversas áreas do conhecimento e estruturados formalmente pelos matemáticos. No nosso caso, trata-se das equações da relatividade geral que descrevem modelos cosmológicos, cada um deles representando uma geometria espacialmente homogênea e isotrópica.

O mundo linear e não linear

Talvez a característica que melhor representa a oposição entre a ciência do século XIX e a do século XX seja a condição linear. Enquanto o século XIX, ao organizar sistematicamente o conhecimento global que a ciência havia adquirido nos três séculos anteriores, pautou-se, em suas grandes sínteses de descrição do mundo físico, por um apelo à linearidade,³ o século XX iniciou uma revolução rumo ao não linear. Esse movimento de exaltação do não linear não se limitou à física, mas invadiu as demais ciências, difundindo-se até mesmo — *et pour cause* — pelas ciências humanas. Irei me limitar a considerar sua influência na física e na cosmologia. Para tanto, é necessário apresentar, mesmo que superficialmente, algumas de suas características básicas, para que o leitor possa me acompanhar na análise.

Entre várias características que distinguem esses mundos, devemos citar, em primeiro lugar, a de que o mundo linear não é somente mais simples, de tratamento matemático mais acessível e de fácil manipulação. Mais importante que isso, ele é previsível. Admite, entre suas características mais notáveis, a possibilidade de construção de uma história causal e determinista do mundo.⁴ Um processo é linear se seu agente não atua sobre si mesmo. Talvez o modo mais simples de caracterização de uma teoria linear seja aquele feito através da linguagem matemática. Consideremos uma teoria descrita por uma determinada equação que a caracterize e que determina a evolução de um certo processo na natureza, de qualquer origem. Os exemplos de fenômenos que essa teoria permite observar no mundo estão descritos integralmente pela totalidade das soluções daquela equação. Consideremos duas dessas soluções correspondendo a situações distintas, ambas descritas pela mesma equação — distinguidas pelas particularidades de cada processo, explicitadas em cada uma das duas soluções.

A questão crucial capaz de descrever inequivocamente a linearidade da teoria está relacionada ao comportamento dessas duas soluções quando as consideramos em conjunto. Assim, se for possível, pela simples adição das

soluções, obter uma nova solução da mesma equação, então isso sinaliza a propriedade linear da teoria. Em verdade, o particular par de crucial capaz de descrever soluções considerado não é relevante, e a propriedade acima deve ser genérica. Desse modo, para quaisquer duas ou mais soluções da equação original, a adição de duas ou mais soluções dará origem a uma nova solução. Essa propriedade permite então gerar cada vez mais soluções. Podemos, por aplicação sucessiva desse procedimento, gerar infinitas soluções.

Creio que o leitor pode por si só reconhecer a força dessa propriedade e a importância que ela deveria ter e efetivamente tem. Vamos encontrar o exemplo mais notável de uma teoria linear — e que se tornou o modo padrão de descrição de qualquer teoria envolvendo algum tipo de campo de interação — na descrição feita por Maxwell, no final do século XIX, dos processos eletromagnéticos. Essa teoria se consolidou como paradigma da estrutura linear das forças da natureza. A tal ponto que, durante um bom tempo, os físicos pensaram que a aparência não linear de alguns processos se devia à complexidade dos agentes envolvidos, e não deveria ser associada a alguma estrutura básica, não poderia ser uma propriedade de algum campo fundamental. Contudo, no começo do século XX, a situação na física da gravitação mudou completamente esse modo de pensar. Podemos atribuir a mudança, em grande parte, à teoria da relatividade geral. É possível mesmo dizer que, com respeito à questão, a nova teoria da gravitação, envolvendo processos de autointeração, abriu caminho para consolidar a não linearidade como podendo ser igualmente associada a processos fundamentais.

É possível entender a situação repetindo um argumento que usamos anteriormente, ao analisar com maior cuidado as duas forças de longo alcance, a eletromagnética e a gravitacional. A primeira tem como fonte as cargas elétricas em repouso ou movimento, que existem sob diferentes formas. Para interagir através da força eletromagnética, um corpo, uma partícula, deve ter uma característica especial: possuir carga elétrica. Essa carga é a propriedade essencial que lhe garante o passaporte para penetrar o território onde essa força se manifesta. Uma partícula, como o neutrino, por exemplo, que não possui carga, não pode interagir pelo canal eletromagnético.

Nada semelhante ocorre com o campo gravitacional. A razão para isso não é difícil de entender, se considerarmos a teoria da gravitação de Einstein. Segundo ela, a fonte da gravitação não é somente a massa dos corpos materiais — como era o caso na física newtoniana —, mas energia sob qualquer forma. Ora, o próprio processo gravitacional, o emissário da força gravitacional, por sua vez, consiste em uma forma particular de energia, logo, deve também participar da interação gravitacional. Por conseguinte, a teoria não pode ser linear. Em outras palavras, a força gravitacional constitui um exemplo notável, simples e acessível de um processo a um só tempo fundamental e não linear.

Assim, para espanto até mesmo dos cientistas, embora a natureza apareça, em nosso cotidiano, sob uma aparência linear, ela é fundamentalmente não linear. Em apoio a essa sentença, sua generalidade e abrangência, lembremos que não existe nada mais universal que a força gravitacional. Em verdade, podemos mesmo dizer que, à luz dos conhecimentos atuais sobre as forças da natureza, tudo que existe sente o campo gravitacional. Essa característica pode ser usada para produzir uma definição operacional do que significa existir: alguma coisa existe se possui interação gravitacional.

Em nosso cotidiano, a vida do dia a dia mostra a todo momento que as relações humanas, o mundo social, as relações entre os homens e de cada um consigo mesmo, sempre foram vistas como se constituíssem um processo altamente não linear. Parecia que a não linearidade estava ligada essencialmente a processos complexos envolvendo estruturas multicomponentes como o homem, a sociedade, as relações políticas, estrelas e galáxias. Assim, constituiu um enorme choque cultural a percepção, no começo do século XX, de que situações bem comuns e até mesmo algumas fundamentais, elementares, como os processos gravitacionais, têm a característica marcante de ser não lineares. Se me estendo nessa aparente trivialidade, se repito tal afirmação várias vezes é porque quero fazer com que o leitor perceba comigo a dificuldade que foi a assimilação, por parte da comunidade científica, da passagem do linear — como paradigma a ser perseguido na construção de uma história racional e completa do mundo — para o não linear.

Surge assim a questão: como entender a criação do Universo, como vimos antes, a partir de um estado fundamental? Seria possível conceber outros estados que estariam, de alguma forma a ser precisada, conectados a outros Universos, isto é, relacionar diferentes soluções particulares das equações da gravitação? E essa seria uma característica das equações de Einstein, ou nada mais que um particular exemplo de uma situação geral, típica da não linearidade? Para concluir a tarefa de dar sentido à questão-título deste capítulo, vamos examinar um caso particular de análise matemática que complementa nossa apresentação.

Pequeno *intermezzo* matemático

Torna-se necessária aqui uma observação técnica. As equações (diferenciais) que descrevem, como no caso dos processos gravitacionais, efeitos não lineares têm uma característica extremamente desagradável: elas são difíceis de resolver. Em geral, não há um método, um algoritmo que permita, através de uma sequência definida de operações matemáticas, obter uma solução. Por essa dificuldade, métodos alternativos para extrair alguma forma de informação de uma dada equação não linear, foram desenvolvidos.

Um desses métodos, e que nos interessa particularmente aqui, é a chamada análise qualitativa. Para dar uma ideia, ainda que limitada e simples, do alcance desse método vamos nos limitar a considerar um fenômeno físico capaz de ser descrito por duas variáveis que dependem somente do tempo, e que chamaremos de $H(t)$ e $E(t)$. Um sistema dinâmico especial ocorre quando as equações que descrevem esse sistema forem do tipo⁵

$$dH/dt = f(H,E)$$

$$dE/dt = g(H,E)$$

onde as funções f e g —que dependem da expansão do Universo caracterizada pela letra H e da densidade de energia descrita pela letra E — são dadas pelas equações da relatividade geral. Em tais casos especiais, é possível representar o conjunto completo de soluções do sistema em um gráfico que, no nosso exemplo de somente duas variáveis, reduz-se a um plano, a duas dimensões. Cada curva nesse plano representa uma dada solução, e uma curva não cruza a outra, exceto em alguns poucos pontos especiais.

Somente para dar um exemplo da complexidade desse sistema de equações e ao mesmo tempo exibir a clareza do método de análise, vamos apresentar duas figuras que constituem o conjunto de todas as soluções das equações de Einstein, representando respectivamente (caso 1) universos do tipo examinado por Friedmann (isto é, exibindo homogeneidade e isotropia espacial) gerados por fonte associada a um fluido perfeito (Figura

9); e (caso 2) um sistema de Friedmannn cuja fonte é um fluido que possui viscosidade (Figura 10). Nessas figuras, o eixo horizontal representa a densidade de energia E , e o vertical, o fator de expansão H . Cada curva das figuras representa uma solução exata do sistema de equações de Einstein, isto é, representa uma geometria de um dado Universo. Estamos então representando, nessas figuras, infinitas geometrias, infinitos universos.

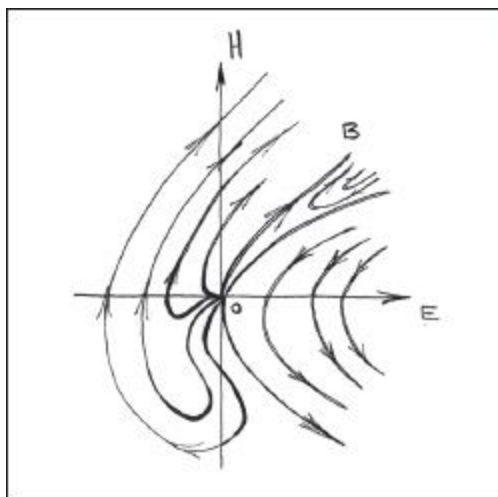


Figura 9
Espaço de fase 1

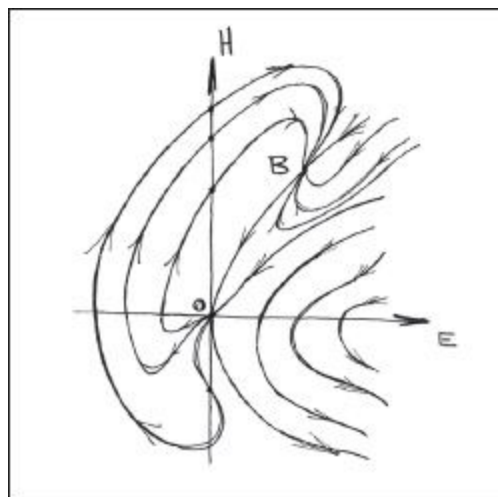


Figura 10
Espaço de fase 2

Uma diferença crucial aparece nesses dois sistemas, e nos interessa particularmente destacá-la. Na Figura 9, podemos ver que somente a origem (representando a situação em que E e H são ao mesmo tempo nulos) constitui um estado (que, nesse caso, representa o vazio, sem matéria e sem expansão, isto é, a geometria de Minkowski) no qual se encontram diferentes soluções — exemplos possíveis de processos reais, controlados pelas equações de Einstein. Já no caso da presença de processos viscosos (Figura 10), aparece um novo ponto de interseção de curvas, soluções das equações. O ponto de equilíbrio B funciona como se atraísse todas as soluções em sua vizinhança, enquanto o ponto O , a origem do sistema de coordenadas, identificado com o vazio, é altamente instável.

Os exemplos nos levam a perguntar: como devemos entender a afirmação de que uma dada solução das equações que descrevem a geometria do Universo pode servir de ponto de equilíbrio — ser o "atrator" — de um sistema de universos? Ou — para estabelecer o ponto de contato com nossa questão neste capítulo — como relacionar (no caso do ponto O , o Vazio) um estado anterior ao Universo, à sua aparição? À primeira vista, essa indagação parece não fazer sentido, não parece uma questão científica. Pode-se pensar que se trata de propriedades envolvendo um agente a que não temos acesso, que possivelmente nem faça parte de uma estrutura capaz de ser submetida à observação e, conseqüentemente, que não deveria ser matéria de nossa análise.

Para ultrapassar essa desconfiança e conseguirmos acesso para penetrar o caminho que permite dar sentido à questão, vamos procurar entendê-la examinando um caso simples, mas que contém o essencial de nosso argumento. Concentremo-nos na parte final, que parece ser aquela que necessita de um esclarecimento maior. O que se está querendo dizer quando se fala de "ponto equilíbrio de um sistema de universos"? Como deve ser entendida essa sentença que parece não estar comprometida com o autoritário e fechado discurso científico, que exige sua intervenção unicamente sobre os observáveis do mundo?

Reconhecemos de imediato que não se trata de discurso sobre um universo isolado, mas sim de um conjunto de universos. Isso significa que não falamos de uma estrutura sensível, que está sob o controle da observação, mas de coleções de estruturas, cada uma delas sendo, *per si*,

um universo. Falamos de uma coleção de elementos tais que cada um deles é um universo. Não devemos pensar que existe um modo de colocar esses universos em uma ordem, alguma forma de sequência, pois isso seria imaginar que podemos ter acesso a uma representação desses universos sob controle externo observacional. Então, do que se trata?

Estamos falando de coleções de objetos que podem ser entendidas, cada uma delas, como uma boa solução das equações de Einstein? Sim, é disso que se trata. Não devemos imaginar que as soluções representem alguma forma de ação correspondendo a uma dada situação de equilíbrio sobre uma outra, mas que são propriedades exibidas no território da virtualidade.

Desse modo, por analogia, damos sentido à expressão de que há anterioridade ao Universo e identificamos o estado primordial com o Vazio, trazendo a virtualidade para o centro de nossa análise. Podemos assim completar nosso sobrevoo da questão envolvendo a relação entre o estado Vazio e a solução cosmológica que estamos examinando. Desse breve desvio podemos entender que penetramos o coração da tradição em que as regras da ciência são constituídas e em que a refundação da física não pode ser ignorada.

¹ E.M. Cioran, *La tentation d'exister*.

²Ver Mário Novello, *Cosmos et contexte*, op.cit.

³ Um bom exemplo da abrangência da formulação linear se encontra na eletrodinâmica de Maxwell, que foi a base escolhida para orientar, formular e sustentar o programa realizado pela teoria da relatividade especial.

⁴ Em verdade essa não é uma das propriedades definidoras do mundo linear, mas somente uma possibilidade que ele admite e que lhe foi associada de modo abrangente e dominante.

⁵ O leitor interessado em mais detalhes quanto à parte técnica dessa análise pode consultar Arnold; quanto à parte referente ao uso dessa técnica para elaborar suas consequências em diversos aspectos de natureza filosófica deve consultar Prigogine *et al.*

Conclusão

A análise da aplicação das leis da física ao Universo, bem como sua extensão iniciada por Einstein, serviu para que pudéssemos ter uma ideia, mesmo que superficial, da função da cosmologia. Depois desse longo caminho podemos olhar para trás e rever a estrada por onde caminhamos, se conseguimos sair da floresta ou se nos perdemos por lá. Afinal, um caminhante que se embrenha na floresta pode iniciar seu caminho aleatoriamente ou seguir passo a passo o que lhe indica um mapa. Em qualquer dos casos, ele pode vez por outra modificar a direção. Ou para se adequar mais corretamente ao mapa do qual, de alguma forma, se desviara; ou por algum detalhe local que atraia sua atenção, como a aparição de uma nova espécie de planta que lhe pareça particularmente especial e que jamais vira. No segundo caso, ele é livre para errar; no primeiro, ele segue um plano que lhe rouba a alegria da descoberta, mas lhe garante a segurança que o leva a sair da floresta. A escolha de uma ou outra dessas atitudes depende de cada um. Fizemos uma escolha especial, e quero agora fazer um balanço da escolha.

Podemos dizer que a visão global consubstanciada na estrutura Universo ocupa hoje um lugar de destaque no pensamento científico contemporâneo. Mais que isso, o conceito de totalidade que a cosmologia produziu permeia praticamente toda a atividade da física fundamental. Desde a segunda metade da década de 1960 a grande comunidade de cientistas, formada por cosmólogos, astrônomos, físicos, astrofísicos e outros, a utiliza e faz dela uma noção convencional, de par com os demais conceitos e características específicas com que elabora e dá significado aos diversos fenômenos e processos observados. A partir daí, colocam-se questões, indagações sobre o encadeamento formal daqueles processos e fenômenos, que seriam reduzidas, menores, incompletas sem essa componente global.

Por razões que já comentamos, não devemos aceitar a tentativa, baseada em uma ideologia pragmática, instrumentalista, de redução da função da cosmologia, limitando seu alcance e retirando sua grandiosidade, como se ela fosse somente uma física extragalática. Essa função, como vimos, pertence a O que é cosmologia? uma ontologia regional, ela não possui a ambição de estabelecer uma refundação global, completa da física.

Ao tentar deixar de lado a função mais importante da cosmologia, perpetra-se um movimento de diminuição de seu papel que tem várias consequências. Entre elas, a mais dramática consiste na impossibilidade de produzir uma explicação do momento de criação, na versão original do big-bang, que se constituiria, graças a essa inacessibilidade, na aceitação da existência de um momento único de criação de tudo-que-existe, inacessível não somente à observação, mas também a qualquer descrição racional — levando inevitavelmente ao suicídio da razão cósmica.

A cosmologia foi severamente criticada por sua ambição de produzir afirmativas sobre o mundo que a física não se permitiu. E esse impedimento não foi imposto de fora. Não provém de alguma tentativa de um outro saber que impediria tal movimento. Não, a impossibilidade, como vimos, veio de dentro, teve origem no núcleo duro dessa ciência, refletindo-se na tentativa de redução da função da cosmologia a uma física extragalática. Entre as questões típicas de seu território de investigação estão algumas que comentamos aqui.

- Qual a origem da expansão global do Universo?
- Quais os dados iniciais do Universo?
- Existem outras dimensões além das quatro de espaço-tempo?
- Por que existe mais matéria que antimatéria?
- Por que existe alguma coisa em vez de nada?
- Por que a massa das partículas elementares, como o próton e o elétron, tem o valor que possui, e não outro?
- Por que a entropia sempre aumenta?

A cosmologia produz um discurso sobre essas questões, permite que elas sejam penetradas, construindo, inventando e codificando nosso

conhecimento sobre elas. Isso nos ajuda a entender por que afirmamos um modo novo de conceber seu papel. Sua verdadeira dimensão deve ser procurada precisamente no lugar em que ela abre o acesso a esse tipo de indagação. Para desempenhar esse papel, a cosmologia deve refundar a física, reexaminar os fundamentos sobre os quais ela repousa e se sustenta.

A refundação da física requer a orquestração da totalidade do mundo, essa é a função da cosmologia. As diferentes partes, os diferentes setores da física, somados, não produzem um discurso completo sobre o mundo. Falta alguma coisa, falta a base sobre a qual podemos descrever e fundamentar um discurso exaustivo e completo sobre o mundo. Isso que falta, essa ausência inibidora de um projeto maior, é a cosmologia que a provê. É ela que tem a função de sustentar o discurso global sobre o mundo. E, sem esse discurso, a física — nosso conhecimento científico e racional sobre a natureza — fica multifacetada, dividida, não tem a condição necessária para permitir que descrevamos de um modo unificado a totalidade de nossas observações; e, mais grave ainda, sem que possamos organizar esse conhecimento integrado a partir de um ponto de apoio descrito em seu interior.

Assim, com prática análoga à que os filósofos das ontologias representam como a função crítica de Kant, como uma refundação da metafísica tradicional, ao proceder à refundação da física, incorporando todas as forças da natureza, produzindo uma descrição completa do Universo, tentando responder às questões que acima enumeramos e outras que aparecem nas bordas de nosso conhecimento, realiza-se uma verdadeira crítica dessa ciência. Damos o nome de cosmologia a tal atividade.

Reflexão final

Pensar a Totalidade, refundar a física — função com a qual identificamos aqui a atividade da cosmologia —, isso requer uma dedicação integral. A tarefa não pode ser realizada por partes, em tempo parcial. Creio ter deixado claro essa necessidade na produção de uma ciência global. Por isso não devemos identificar a física à cosmologia, embora ambas tenham suas origens entre os companheiros de Galileu. Ali, como disse em nossa primeira conversa, na Introdução, a física foi fundada, ali a ciência começou um caminho que se revelou, de imediato, tão cheio de resultados e descobertas que a questão de seus fundamentos era então secundária. E, de um certo modo, sempre foi secundária. Quando digo isso não estou esquecendo de olhar para aqueles movimentos de estruturação lógico-formal que de tempos em tempos vemos aparecer.

Refundar não é estabelecer a estrutura lógica de um conhecimento que adquirimos ou fabricamos sobre o mundo. A atividade do cientista, ao empreender essa refundação, como ocorreu na crítica kantiana, não lhe impõe como condição o abandono de seu perfil de físico. Assim como, ao empreender a refundação da metafísica, Kant se identifica integralmente como filósofo, ao empreender a refundação da física, o cientista também pode se apresentar como físico. Se aqui o tenho chamado singularmente de “cosmólogo” é somente para particularizar sua função, ou melhor, sua atitude em face dessa atividade ainda em formação.

Heidegger pôde chamar Kant de filósofo, pois a crítica já havia sido realizada. Nós, caminantes como Einstein, somos cosmólogos não porque deixamos de ser físicos, mas porque consideramos que a tarefa de refundação iniciada em 1917 ainda está em atividade, em formação. E, contrariamente à filosofia, que sobreviveu e foi além de Kant, colocamos a pergunta se nossa tarefa de refundação irá algum dia nos liberar, ou se esse

papel, uma vez iniciado, não será carregado para sempre pelo físico-cosmólogo.

Desse modo, conseguimos entender por que a cosmologia moderna permite problematizar o Universo e até mesmo elaborar um cenário completo do processo de sua criação, a partir de um estado que chamamos de Vazio e que pode ser identificado como a representação formal, científica, do que entendemos usualmente por esse nome: como ausência, inexistência de qualquer coisa, de matéria, energia e de estruturas geométricas no espaço e no tempo. Vimos que a cosmologia pode produzir resposta para um tipo de questão que, desde o aparecimento da ciência moderna, esta preferiu não examinar.

No entanto, é crucial não nos deixarmos levar por esse canto de sereia e atribuímos à cosmologia uma só função, identificando-a como a procura racional da origem e criação do Universo. Pois se é verdade que tal questão pode ser efetivamente tratada por essa ciência, ela nada mais é que uma indagação técnica, possibilitada pela verdadeira função da cosmologia: a refundação da física. É precisamente porque esta requer a crítica de seus fundamentos, para estabelecê-los em bases mais profundas, que podemos investigar a existência de um estado fundamental associado a uma descrição do começo do Universo, ocorrido há um tempo finito ou infinito.

E é então porque a cosmologia permite colocar questões fundamentais, tais como a principal delas — “por que existe alguma coisa em vez de nada?” —, que ela vai além da física, que não pode se identificar com ela. A cosmologia deve ser entendida como crítica, estabelecendo uma razão cósmica e constituindo, nesse ato, a refundação da física; tratando questões que esta ciência se proibiu de examinar, quando se autolimitou, restringindo-se a tratar do que lhe parece ser a realidade, seu domínio de ação, evitando a todo custo considerar a virtualidade como um reservatório de intenções da natureza.

Pois é precisamente isto que a cosmologia faz, ou melhor, se propõe fazer: ir além, ousar estabelecer uma ponte transponível entre a física e outros saberes que envolvem a Totalidade, tornando possíveis as duas direções. A cosmologia pode avançar em pleno território da virtualidade, para de lá extrair o que está de tal modo identificado com a máscara do real, que ela quase não pode mais ser retirada.

É assim que devemos entender a função da cosmologia, como um resgate da ciência em seus primórdios, quando ela ainda deixava as portas abertas para que a tradição que o homem acumulara ao longo de sua história, nos variados saberes, pudesse por ali passar, entrar e sair. Resgatar outros saberes, colocar-se a questão fundamental e repeti-la inúmeras vezes: “Por que existe alguma coisa em vez de nada?”

Se os filósofos fizeram dessa questão um tema convencional de sua investigação, nem por isso ele se torna proibido para os outros, aqueles amigos de outros saberes. A física deixou de lado essa questão, e hoje devemos reconhecer que essa estratégia é entendida como vitoriosa, pois foi capaz de permitir que ela prosseguisse avançando em seu conhecimento e em sua dominação da natureza. Mas, hoje, quando a cosmologia assume seu papel e se estrutura para produzir, em sua prática científica, a refundação da física, deixar de examinar a questão fundamental em nome de compromissos passados ou em nome da negação da produção de hipóteses sobre a natureza da *physis* não pode mais ser considerada uma razão suficiente. Pensar que ela não produziu os instrumentos formais com os quais essa pergunta adquire significado em seu interior e permite o acesso a respostas aceitáveis seria desprezar a etapa de evolução por que a cosmologia passou, seria esquecer que, afinal, ela deve ser entendida em seu significado abrangente, como a etapa atual de evolução da física. Dessa forma, se estabelecem sua função e uma nomenclatura convencional na qual o que importa é menos o nome — cosmologia ou física —, mas a atitude, o compromisso com a refundação dessa ciência.

Mas não podemos esquecer, contudo, que há um outro aspecto grandioso dessa ação da cosmologia, pois ao mesmo tempo que estamos olhando e organizando, com nossos companheiros de ciência, a entrada dessa questão fundamental em nossa prática científica, não podemos esquecer que estamos igualmente penetrando o coração da aldeia filosófica e que ali não devemos nos declarar amigos da sabedoria, amigos dos filósofos, mas sim seus concorrentes.

Devemos disputar, no território tradicional da metafísica, a questão fundamental. E, ali chegando, entre esses amigos do saber, ao sermos por eles questionados sobre nossa função e expectativa, naquele lugar onde a questão fundamental se estabelece como tal, não devemos responder como

físicos, mas como cosmólogos. Não devemos procurar afirmar uma resposta de controle, mas repetir *ad nauseum*: estamos aqui porque queremos usar todos os meios que a razão permite para também colocar a mesma pergunta. Não porque, como alguns afirmam com arrogância, tenhamos a resposta ao nosso alcance, pronta, definitiva. Nem porque queiramos impor a esses amigos do saber um modo preferencial, único, de formular essa pergunta. Nem para contrapor nossa visão especial à deles. Mas simplesmente porque, como expusemos em nossa caminhada aqui, nós, cosmólogos, encontramos um modo diferente, novo, particular de responder à pergunta fundamental, esta antiga questão: por que existe alguma coisa em vez de nada?

Como vimos nessa caminhada, o cosmólogo pode afirmar, a partir da constatação formal da instabilidade do Vazio, a partir do decaimento e transformação desse Vazio, que não seria possível não haver alguma coisa: o Universo estava condenado a existir. Ou, como dissemos atrás, é difícil, é muito difícil, é quase impossível não existir.

Bibliografia

- ALDROVANDI, Ruben. "Cosmological Term and Fundamental Physics."
In arXiv.gr-qc/ 0405104, maio de 2004.
- CIORAN, E.M. *La tentation d'exister*, Paris, Gallimard, 1956.
- COTTA MELLO, Elizabeth. *Estudo sobre as cosmogonias nas civilizações antigas*. Tese de mestrado, Rio de Janeiro, Fundação Getúlio Vargas, 1991. Tese de doutorado, Rio de Janeiro, Instituto de Psicologia UFRJ, 2002.
- EINSTEIN, Albert. *The Meaning of Relativity*. Princeton, Princeton University Press, 1950.
- ELBAZ, Edgard. *Quantique pour un profane*, Paris, Atlantisciences, 2001.
- HEIDEGGER, Martin. *Interprétation phénoménologique de la "Critique de la Raison Pure" de Kant*, Paris, Gallimard, 1982.
- MERLEAU-PONTY, Jacques. *Cosmologie du XXe siècle*, Paris, Gallimard, 1965.
- NOVELLO, Mário. *Cosmos et contexte*, Paris, Masson, 1987.
- _____. *Jeux cosmiques*, Paris, Ed Ellipses, 2005.
- _____. *Máquina do tempo, um olhar científico*, Rio de Janeiro, Zahar, 2005.
- _____. *Os jogos da natureza*, Rio de Janeiro, Campus, 2004.
- NOVELLO, Mário e J.M. Salim. *Physical Review D*, v.20, 1979, p.377-83.

- NOVELLO, Mário, Luís Alberto R. Oliveira, J.M. Salim e E. Elbaz. *International Journal of Modern Physics D*, 1, 1993, p.641.
- PEACOCK, John. *Cosmological Physics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1999.
- PEEBLES, P.J.E. *Principles of Physical Cosmology*, Princeton University Press, 1993.
- PRIGOGINE, Ilya e Isabelle Stengers. *La nouvelle alliance*, Paris, Gallimard, 1979.
- RAYCHAUDHURI, A.K. *Theoretical Cosmology*, Oxford, Claredon Press, 1979.
- SVAITER, Nami Fux. *Teoria quântica de campos e sistemas de coordenadas curvilíneas no espaço-tempo de Minkovski e em espaços curvos*. Tese de doutorado, Rio de Janeiro, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 1989.
- TRAUTMAN, A. *Lectures on General Relativity*, Nova Jersey, Prentice-Hall, 1964.

Copyright © 2006, Mário Novello

Copyright desta edição © 2006:

Jorge Zahar Editor Ltda
rua Marquês de São Vicente 99, 1º andar
22451-041 Rio de Janeiro, RJ
tel.: (21) 2529-4750 / fax: (21) 2529-4787
editora@zahar.com.br
www.zahar.com.br

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo
ou em parte, constitui violação de direitos autorais. (Lei 9.610/98)

Grafia atualizada respeitando o novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Revisão: Maria Helena Torres e Michele Sudoh

Ilustrações: Érico Goulart

Capa: Dupla Design

ISBN: 978-85-378-0204-5

O QUE É COSMOLOGIA?
A REVOLUÇÃO DO PENSAMENTO COSMOLÓGICO
MÁRIO NOVELLO

JORGE ZAHAR EDITOR